

Stochastik der Verkehrsdynamik: Von Zeitreihen-Analysen zu Verkehrsmodellen

Christof Liebe



UNIVERSITÄT ROSTOCK

Diplomarbeit

Stochastik der Verkehrsdynamik: Von Zeitreihen-Analysen zu Verkehrsmodellen

vorgelegt von Christof Liebe

Rostock, August 2006

angefertigt an der
Universität Rostock, Institut für Physik
AG Quantentheorie und Vielteilchensysteme

Betreuer: Dr. Reinhard Mahnke
Dr. Peter Wagner

Adresse: Universität Rostock
Institut für Physik
18051 Rostock
Tel: +49 381 498-6944
Fax: +49 381 498-6942
Internet: <http://www.physik.uni-rostock.de>

E-Mail der Betreuer: reinhard.mahnke@uni-rostock.de
peter.wagner@dlr.de
E-Mail des Authors: christof.liebe@uni-rostock.de

Inhaltsverzeichnis

1	Einführung	7
1.1	Die Entwicklung des Straßenverkehrs	7
1.2	Folgen der Entwicklung des Straßenverkehrs	8
1.3	Die Verkehrswissenschaft(en)	8
1.4	Warum Verkehr modellieren?	9
1.5	Ursprung und Historie der Verkehrsbeobachtung	10
1.6	Verkehrsbeobachtung heute	10
1.7	Aufgabe und Zielstellung der Arbeit	11
2	Der Datensatz	12
2.1	Allgemeines zum Datensatz	12
2.2	Die technische Realisierung	12
2.3	Aufbau des Datensatzes	14
2.4	Vorbereitung des Datensatzes für die Auswertung	15
3	Untersuchung und Korrektur des Original-Datensatzes	16
3.1	Trajektorien	16
3.2	Verteilungen	21
3.3	Kritik am Datensatz	23
3.3.1	Rauschen in den Daten	23
3.3.2	Falsche Spureinordnungen	23
3.4	Glätten der Daten	24
3.4.1	Der Savitzky-Golay-Filter	24
3.4.2	Glättung der Positionsdaten	26
3.4.3	Glättung der Geschwindigkeitsdaten	27
3.4.4	Glättung der Beschleunigungsdaten	27
3.5	Spureinordnung	30
3.6	Konsequenzen	32
4	Auswertung des korrigierten Datensatzes	33
4.1	Fundamentaldiagramme	33
4.2	Dichteverlauf	35

5	Die Modellierung und Simulation des korrigierten Datensatzes	38
5.1	Berechnung der Sicherheitgeschwindigkeit	38
5.2	Verkehrsmodelle	39
5.2.1	Das Bando-Modell	39
5.2.2	Ein künstliches Modell	41
5.2.3	Das erweiterte künstliche Modell	41
5.3	Zufallszahlen	42
5.4	Spurwechselmodelle	43
5.5	Charakteristische Fahrzeugwerte finden	43
5.5.1	Maximalgeschwindigkeit	43
5.5.2	Maximalbeschleunigung	44
5.5.3	Zeitabstand für Sicherheitgeschwindigkeit	46
5.5.4	Zielwerte	48
5.5.5	Andere Modell-Parameter	49
5.5.6	Werte zum Spurwechsel	49
5.5.7	Die Startwerte eines Fahrzeugs	50
5.5.8	Die Endwerte eines Fahrzeugs	51
5.6	Der Spurwechsel	51
5.7	Die Aktualisierung	52
5.8	Ablauf der Simulation	54
6	Analyse und Vergleich der Simulationsdaten	55
6.1	Fundamentaldiagramme	56
6.2	Dichteverlauf	59
6.3	Variierte Parameter	59
6.4	Berechnete Werte	66
6.5	Mittelwerte und Standardabweichungen	68
6.6	Der beste Parametersatz	68
6.7	Schwächen des Parametersatzes	72
7	Zusammenfassung und Ausblick	74
7.1	Was wurde getan?	74
7.2	Was wurde nicht getan?	74
7.3	Zukünftige Anwendungen	75

1 Einführung

Um das Jahr 4000 v. Chr. wurde das Rad erfunden [13]. Dies geschah unabhängig voneinander in mehreren Kulturen.

Diese Erfindung sollte in den folgenden 6000 Jahren weitreichende Konsequenzen auf die Entwicklung der Menschheit haben. Dies wird sich wohl auch in den nächsten 1000 Jahren nicht ändern, wenn man bedenkt, dass sich der weltweite Kraftfahrzeugbestand (Anzahl der jemals produzierten Kraftfahrzeuge) zwischen 1990 und 2002 um rund 44% von 560 Milliarden auf 808 Milliarden Fahrzeuge gesteigert hat [12].

1.1 Die Entwicklung des Straßenverkehrs

Bevor sich das Automobil (griechisch *άυτο* - selbst und lateinisch *mobilis* - beweglich) zu einem Massenartikel entwickelte, bedurfte es vieler Jahre Entwicklung. Rund 3600 Jahre nach der Erfindung des Rades wurden Hellenische Belagerungstürme durch Treträder, also durch Muskelkraft bewegt. Ein Grieche namens Heron von Alexandria baute 100 v. Chr. eine Art „Dampfmaschine“, welche damals bereits Grundelemente des heutigen Automotors wie zum Beispiel einen Kolben enthielt. Sogenannte „Muskelkraftwagen“ verbreiteten sich in Europa und tauchten 1447 auch in Deutschland auf. Die erste Kolbenmaschine wurde 1674 von dem holländischen Physiker Christiaan Huygens (1629-1695) gebaut. Bei diesem Explosionsmotor, nach dessen Prinzip noch heute die meisten Motoren arbeiten, diente in der Tat Schießpulver als Explosionsstoff. Von dem Jesuitenpater Ferdinand Verbiest (1623-1688) [15] wurde vermutlich das erste Automobil 1678 am chinesischen Hof gebaut und eingesetzt. Hierbei handelte es sich um eine selbstfahrende Dampfmaschine.

Das 19. Jahrhundert brachte diverse Dampfautomobile hervor. Bereits 1828 pendelte ein Dampfbus mehr oder weniger regelmäßig zwischen London und Bath. Der Sentinel, ein erfolgreicher Dampf-Lkw, wurde zu Beginn des 20. Jahrhunderts gebaut. Das 19. Jahrhundert brachte jedoch auch neue Motoren hervor. So baute 1802 der Schweizer Isaac de Rivaz den ersten Wagen mit Verbrennungsmotor (u. a. mit einem Wasserstoffgenerator). Nikolaus August Otto lässt 1876 den Viertakt-Ottomotor patentieren. Das Patent wurde 10 Jahre später wieder aufgehoben.

Im Jahr 1886 begann in Deutschland die Entwicklung des heutigen Autos. „Benz & Co.“ reichte eine Patentschrift für ein dreirädriges „Fahrzeug mit Gasmotorenbetrieb“ ein. Der Erfinder Carl Benz fuhr damit auch öffentlich herum. Zwischen 1894 und 1902 stellt er als erster ein Fahrzeug in Serie her.

Das 20. Jahrhundert war geprägt durch technische Neuerungen, die eine Massenproduktion möglich machten. Die Autos wurden bezahlbar und für eine breite Bevölkerungsschicht zugänglich. Während ein Auto Anfang des 20. Jahrhunderts noch kurios anmutete, ist es aus dem heutigen Stadtbild nicht mehr wegzudenken.

Im 21. Jahrhundert wird die Zahl der Autos weltweit aufgrund der Industrialisierung vieler Länder noch stark zunehmen. Es werden vermehrt elektronische Systeme wie Navigationssysteme Anwendung finden, die den Fahrer unterstützen. Die Verteuerung von Rohstoffen wird die Entwicklung von alternativen Antrieben und Energiequellen im Automobilbereich voran treiben. Fortschritte in der Materialforschung und Druck durch wachsende Rohstoffknappheit werden dazu führen, dass wiederverwertbare Rohstoffe bei der Herstellung von Autos Anwendung finden.

1.2 Folgen der Entwicklung des Straßenverkehrs

Das Auto hat wie kaum ein anderes industrielles Massenprodukt das Leben des Menschen verändert. Die Autoindustrie an sich ist ein bedeutender Wirtschaftsbereich in vielen Industrieländern. Kernpunkt der Bedeutung des Automobils ist jedoch die Mobilität und die Flexibilität. Während einen die Bahn sehr schnell von einem Ort zum anderen bringt, bietet einem jedoch nur das Auto die Möglichkeit, dies auch zu jedem beliebigen Zeitpunkt zu tun. Der Güterverkehr auf der Straße ist vor allem bei leicht verderblicher Ware von Bedeutung. Just-in-time-Lieferungen ermöglichen einen schnellen Bauablauf. Zum 1. Januar 2004 waren in Deutschland 49.648.043 Automobile zugelassen. Das bedeutet, dass auf zwei Einwohner mehr als ein Auto kam. Diese immense Zahl an Autos sorgt vor allem in Städten durch den im Vergleich zu Bussen sehr großen Platzbedarf für Staus und Parkplatzmangel.

Das Auto ist bei neutraler Betrachtung ein *Transportmittel* mit drei besonderen Vorzügen:

1. *Transport* größerer bis großer Lasten
2. *Mobilität* durch hohe Geschwindigkeit
3. *Individualität* durch Flexibilität der einzelnen Person

Diese drei Vorzüge führten zu der schnellen und starken Verbreitung des Autos und zu einer Erhöhung der Leistungsfähigkeit und Produktivität einer Gesellschaft. Ohne Mobilität ist eine moderne Gesellschaft kaum noch denkbar. Die starke Prägung eines jeden Stadtbildes durch ein dichtes Straßennetz ist nur ein Ergebnis dieser Entwicklung.

1.3 Die Verkehrswissenschaft(en)

Die bisher besprochene Entwicklung zeigt, dass eine Gesellschaft abhängig von einem funktionierenden Straßenverkehr und der für ihn notwendigen Infrastruktur ist.

Bis zur Mitte des 20. Jahrhunderts wurde der Verkehr als Forschungsgegenstand in der Disziplin Nationalökonomie oder dem Ingenieurwesen behandelt [14]. Außerdem fand zusätzlich eine verkehrsträgerspezifische Trennung (Schifffahrt, Straßen- und Brückenbau, Eisenbahn) der Verkehrswissenschaft statt. Erst die sich herauskristallisierende politische, wirtschaftliche und technische Bedeutung des Verkehrswesens brachte eine übergreifende wissenschaftliche Betrachtung der verschiedenen Aspekte von Mobilität und Verkehr und führte damit zur Entstehung der Verkehrswissenschaft(en). Dabei ist man sich nicht einig, ob es *eine* Verkehrswissenschaft gibt oder ob die Teilgebiete wie zum Beispiel Verkehrssoziologie, Verkehrsrecht oder Verkehrsplanung für sich jeweils eine eigene Disziplin darstellen.

Eine Sonderrolle bei dieser Diskussion spielt dabei u. a. die Verkehrsphysik, die nach vielfacher Ansicht unabhängig von soziologischen, ökonomischen, technologischen oder technischen Randbedingungen eine eigene Verkehrswissenschaft darstellt.

1.4 Warum Verkehr modellieren?

Unabhängig von Definitionsfragen über die Abgrenzung der Verkehrsphysik ist klar, dass es wichtig ist, den Straßenverkehr zu verstehen, Vorhersagen zu machen und gegebenenfalls regulierend zu wirken. Während man sich lange Zeit mit dem Bau von mehr Straßen aushalf, wird heutzutage zumindest in Städten der Platz knapp. Das heißt, es sind intelligentere Ansätze gefragt.

Während physikalische Systeme wie Flüssigkeiten oder Gase in ihren Eigenschaften weitgehend verstanden und berechenbar sind, kommt in der Verkehrsphysik ein weitgehend unverstandener Faktor ins Spiel, *der Mensch*.

Leider ist es weitgehend unbekannt, wie der Mensch im Straßenverkehr reagiert. Makroskopische Effekte wie Staubbildung sind mittlerweile gut verstanden. Es können Phasenübergänge ähnlich wie bei herkömmlichen physikalischen Systemen beobachtet und auch reproduziert werden. Ein mikroskopischer Ansatz jedoch fehlt bzw. ist bisher noch nicht akzeptiert.

Die Herangehensweise ist prinzipiell ähnlich wie in der Physik. Man versucht Reaktionen zwischen zwei Teilchen zu beschreiben bzw. zu modellieren und prüft an makroskopischen Effekten, ob die mikroskopische Theorie korrekt ist. In der Verkehrsphysik beschreibt man in Modellen, wie ein Fahrzeug auf die anderen Fahrzeuge, seinen eigenen Zustand und die Straße, also die Umgebung, reagiert. Diese Modelle können im Idealfall analytisch ausgewertet werden. Meist jedoch fließen sie in Simulationen ein, die dann in modernen Rechnern an verschiedenen Verkehrssituationen getestet werden.

1.5 Ursprung und Historie der Verkehrsbeobachtung

Simulationen an sich haben keine Aussagekraft, wenn nicht Experimente bzw. Messungen dafür sorgen, dass Modelle mit der Realität verglichen werden können. Die ersten Verkehrsbeobachtungen wurden von Greenshields 1934 durchgeführt [3]. Er untersuchte den Verkehrsfluss auf freier Strecke mittels Fotos und postulierte einen linearen Zusammenhang zwischen Geschwindigkeit v und Verkehrsdichte ρ .

$$v = v_{max} \left(1 - \frac{\rho}{\rho_{max}} \right) \quad (1.1)$$

Dies führt zu einem parabolischen Zusammenhang zwischen der Geschwindigkeit und dem Verkehrsfluss j .

$$j = v \cdot \rho \quad (1.2)$$

$$j = v \cdot \rho_{max} - v^2 \frac{\rho_{max}}{v_{max}} \quad (1.3)$$

Dieses einfache Modell ließ es bereits zu, eine optimale Verkehrsdichte zu bestimmen, bei der der Verkehrsfluss am höchsten ist. Bei gleicher Verkehrsstärke sind zwei Geschwindigkeiten möglich, wodurch man den Verkehrsfluss in einen stabilen und einen instabilen Bereich unterteilen kann. Da es nur eine Formel ist, die beide Bereiche beschreibt, wird das Modell als Einbereichsmodell bezeichnet.

Hier zeigt sich bereits ein Problem, dass in der Verkehrsforschung auch heute noch zur Diskussion steht. Frühe Studien zur Verkehrskapazität von Autobahnen begründeten sich auf zwei prinzipiell unterschiedlichen Ansätzen. Zum einen wurden Geschwindigkeits-Verkehrsdichte-Beziehungen bei geringen und zum anderen Abstands-Phänomene bei hohen Verkehrsdichten untersucht. Sowohl Lighthill und Whitham (1955) [4] als auch Richards (1956) [7] versuchten die beiden Ansätze mittels der Fluss-Dichte-Kurve der Kontinuumstheorie zu vereinen. Dabei verwendeten Lighthill und Whitman ebenfalls ein Einbereichsmodell. In der Folgezeit wurden die von Greenshields gewonnenen Erkenntnisse zu Zwei- und Mehrbereichsmodellen weiterentwickelt.

Edie (1961) [2] lieferte den ersten Zweibereichsmodellansatz. Er unterscheidet die beiden Bereiche für den freien und den gestauten Verkehr. Prigogine (1961) und Herman (1971) ([5] und [6]) versuchten eine Analogie der Phasen im Verkehrsfluss zu den Phasenübergängen bei den Aggregatzuständen von Wasser (gasförmig - flüssig) herzustellen. Eine weitere interessante Analogie zu physikalischen Systemen untersuchten Treiterer und Myers (1974) [8], als sie das Hysterese-Phänomen im Verkehrsfluss untersuchten.

1.6 Verkehrsbeobachtung heute

Heutzutage gibt es je nach Anwendung viele Möglichkeiten, Verkehrsdaten zu erfassen. In Großstädten wie Berlin werden Taxis mit GPS-Empfängern versehen, um

ihre Position und Geschwindigkeit zu messen [16]. Dies gibt die Möglichkeit, die Verkehrssituation der Stadt relativ genau darzustellen. Anwendungen dafür sind Stauwarnungen und Umgehungshinweise im Radio.

Für theoretische Betrachtungen sind meist detailliertere Informationen nötig. Noch ist es nicht möglich, die GPS-basierten Methoden auszuweiten. GPS-Empfänger sind zwar durch Navigations-Systeme weit verbreitet, jedoch werden diese Daten nicht an zentrale Stellen weitergeleitet.

Auf Autobahnen kommen sehr oft Zählschleifen zum Einsatz. Diese messen den Verkehrsfluss j und die Geschwindigkeit v der Fahrzeuge. Daraus lässt sich über die Beziehung 1.2 die Verkehrsdichte bestimmen. Diese Daten sind dann natürlich nur im Bereich der Zählschleife gültig. Auf Autobahnen sind Zählschleifen vor und hinter Auf- bzw. Abfahrten interessant, da man davon ausgehen kann, dass sich in diesen Bereichen sehr viel ändert. Zählschleifen im Abstand mehrerer Kilometer sind üblich.

Über Zählschleifen kann nicht das individuelle Verhalten von einzelnen Fahrzeugen bzw. Fahrern untersucht werden, da nur die Situation an einem einzelnen Ort gemessen wird. Eine Informationsquelle, die genau dies leistet, sind Videoaufnahmen vom Verkehr. Diese haben den großen Vorteil, dass sie nahezu beliebig genaue Informationen über das Verkehrsgeschehen liefern und somit auch alle Informationen von Zählschleifen enthalten. Die Beschaffung und Auswertung solcher Videos ist aufwendig, zeitraubend und eignet sich nicht für die Echtzeitverarbeitung von Daten. Für Untersuchungen von Modellen in Form von Simulationen sind sie jedoch sehr interessant. Ein weiterer Nachteil der Videos liegt darin, dass sie nur das Geschehen in einem kleinen Bereich der Straße wiedergeben können. Eine weiträumige Erfassung über einen Bereich, wie sie für Zählschleifen typisch ist, ist zumindest heute noch nicht möglich.

1.7 Aufgabe und Zielstellung der Arbeit

Die Auswertung eines Datensatzes, der aus oben erwähnten Videodaten erstellt wurde, ist Gegenstand dieser Arbeit. Dabei sollen folgende Aufgaben bearbeitet werden:

- Analyse des Datensatzes und Aufdecken von eventuellen Schwächen und Fehlern
- Korrektur des Datensatzes
- Schreiben einer Simulation zum Testen und Kalibrieren von Verkehrsmodellen anhand des korrigierten Datensatzes

2 Der Datensatz

2.1 Allgemeines zum Datensatz

Der hier untersuchte Datensatz war zum Zeitpunkt seiner Erstellung im Jahr 2003 der erste seiner Art und stellt somit einen großen Fortschritt in der Entwicklung der Verkehrsforschung dar. Das Videomaterial wurde am 3. Dezember zwischen 14.35 Uhr und 15.05 Uhr Ortszeit auf der Interstate 80 zwischen der Powell Street und der Ashby Avenue in Emeryville, Kalifornien aufgenommen [17].

Verantwortlich für das Projekt sind drei Gruppen:

- Federal Highway Administration
Washington, D.C.
USA
- Cambridge Systematics, Inc.
555 12th Street, Suite 1600
Oakland, CA 94607
USA
- University of California, Berkeley
California Center for Innovative Transportation
2105 Bancroft Way
Berkeley, CA 94720
USA

Nur durch die Zusammenarbeit solcher Gruppen ist es möglich, Datensätze dieser Art zu erstellen. Dies ist ein Zeichen für die Komplexität dieser Aufgabe. Dennoch sind die sich ergebenden Möglichkeiten es wert, weiter daran zu arbeiten, solche Trajektorien-Datensätze in möglichst großer Zahl zu erstellen.

2.2 Die technische Realisierung

Der Datensatz wurde durch Auswertung von Video-Material erstellt. Das Video-Material umfasst sechs Filme, die die Strasse aus unterschiedlichen Blickwinkeln



Abb. 2.1: Schnappschuss aller Kameras beim Zeitpunkt $t = 60$ s

und Positionen darstellen. Die Videos sind jeweils etwa eine halbe Stunde lang und liegen in ungekürzter Form vor. Die Videos wurden zunächst mit einem automatischen Algorithmus ausgewertet. Anschließend wurden die Daten von Hand überprüft und gegebenenfalls korrigiert. Das hatte zur Folge, dass die Auswertung des Video-Materials mehrere Monate in Anspruch nahm.

Grundprinzip des Algorithmus war, dass ein Fahrzeug über die komplette Strecke verfolgt und seine Position in jedem Video-Frame registriert wurde. Aus diesen Positionsdaten wurden dann weitere Informationen über Geschwindigkeit, Spureinordnung und anderes abgeleitet. Beim Fehler der Positionsdaten geben die Herausgeber des Datensatzes 0,6096 m (2 feet) senkrecht zur Fahrtrichtung und 1,2192 m (4 feet) in Fahrtrichtung an [17]. Informationen, wie man auf diesen Fehlerbereich kommt, sind leider nicht verfügbar. Eine grobe Schätzung zur Größenordnung kann angegeben werden, wenn man die Geschwindigkeit mit $100 \frac{\text{km}}{\text{h}}$ ansetzt und die Länge eines Frames ($\frac{1}{15}$ s) als Zeitintervall annimmt. Dann ergibt sich eine Distanz von etwa 2 m. Damit ist zumindest die Größenordnung nachvollziehbar und kann im Folgenden als gegeben angenommen werden.

Trotz dieses recht großen Fehlers sollte man bei der Bearbeitung des Datensatzes immer davon ausgehen, dass es auch grobe Fehler gibt, die man ohne zeitraubende Einzelauswertung nicht überblicken kann. Ein Beispiel ist Abbildung 2.1. Beim mittleren oberen Bild sieht man, dass der LKW (siehe Pfeil) am rechten Rand recht schlecht registriert ist. Daraus ergibt sich eine falsch registrierte Position des LKWs über einen langen Zeitraum. Daraus resultierende falsche Abstände führen zu einem schließlich falschen Verkehrsmodell, das auf den falschen Abstandsmessungen beruht. Auf Abbildung 2.2 (rechtes oberes Bild) sieht man außerdem, dass die Länge eines LKWs (siehe Pfeil) falsch gemessen wurde, was wiederum auch zu falschen Abständen führt.



Abb. 2.2: Schnappschuss aller Kameras beim Zeitpunkt $t = 120$ s

Zusammenfassend kann man sagen, dass der Detailgrad dieses Datensatzes einzigartig ist. Die Auswertung von Hand sorgt für Korrekturen eines automatischen Algorithmus. Bei genauerer Auswertung ist jedoch auch zu sehen, dass immer noch Fehler im Datensatz vorhanden sind. Dieser Fehlergrad könnte sicherlich noch verringert werden, wenn man die Video-Daten ausführlicher auswerten würde. Unmöglich ist jedoch sicherlich das Beseitigen aller Fehler aus dem Datensatz. Eine statistische Auswertung der Daten sollte die Bedeutung der Fehler jedoch reduzieren, da diese durch ihre immer noch geringe Anzahl nicht stark ins Gewicht fallen.

2.3 Aufbau des Datensatzes

Am Ende der Auswertung des Video-Materials wurde schließlich der Datensatz selbst erstellt, der als gepackte Textdatei vorliegt und entpackt rund 250 MB groß ist. Einen Ausschnitt zeigt Abbildung 2.3.

Der Datensatz besteht aus 16 Spalten [17]. Die erste Spalte ist eine eindeutige Nummer des betrachteten Fahrzeugs. Die zweite Spalte gibt die Anzahl der Frames im Datensatz an, gibt also wieder, wie lange das Auto untersucht worden ist. Die 3. Spalte gibt die Frame-Nummer an, zu der der jeweilige Datensatz gehört. Spalte 4 gibt die Position senkrecht zur Fahrtrichtung in feet an. Dabei wird der Abstand vom linken Fahrbahnrand zur Mitte der vorderen Stoßstange angegeben. Die 5. Spalte ist die analoge Position in Fahrtrichtung. Spalte 6 und 7 sind ebenfalls Positionsdaten, allerdings basierend auf Stadtplänen der örtlichen Verkehrsbehörden. Die Angaben sind ebenfalls in feet. Spalte 8 gibt die globale Zeit in Millisekunden wieder. Das ist die verstrichene Zeit seit dem 01.01.1970 0:00Uhr GMT. Spalte 9 und 10 geben die Länge und Breite des Fahrzeugs an. Spalte 11 gibt an, ob es sich um einen PKW

4709	424	-14	41.06	104.21	6042894.61	2132879.58	1070490899067
↪22.0	9.8	Auto	87.20	0.00	4	0	0
4709	424	-13	41.48	110.03	6042894.32	2132885.41	1070490899133
↪22.0	9.8	Auto	87.20	0.00	4	0	0
⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮
⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮
78	488	88	41.58	40.85	6042903.05	2132817.04	1070490905867
↪14.4	8.2	Auto	85.66	0.00	4	113	0
78	488	89	41.57	46.56	6042902.31	2132822.70	1070490905933
↪14.4	8.2	Auto	85.66	-10.00	4	113	0
78	488	90	41.56	52.19	6042901.59	2132828.28	1070490906000
↪14.4	8.2	Auto	85.25	-10.00	4	113	0
⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮
⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮
4095	559	26995	72.95	2142.19	6042640.10	2134903.54	1070492699667
↪15.7	9.2	Auto	49.04	0.00	6	3935	0
4095	559	26996	73.40	2145.45	6042640.03	2134906.83	1070492699733
↪15.7	9.2	Auto	49.04	0.00	8	0	0

Abb. 2.3: Ausschnitt aus dem Datensatz; zwei Zeilen bilden einen Datensatz; dargestellt sind der Anfang, ein Mittelteil und das Ende des Datensatzes in unveränderter Form

oder einen Lastwagen handelt. Motorräder sind hier auch möglich, kommen aber in diesem Datensatz nicht vor. Spalte 12 gibt die Geschwindigkeit in $\frac{\text{feet}}{\text{s}}$ an. Spalte 13 ist die Beschleunigung in $\frac{\text{feet}}{\text{s}^2}$. Spalte 14 ist die Spur. Die Spur ganz links ist Spur 1. Es folgen nach rechts die Spuren 2 bis 6. Die Auffahrt ist Spur 7, die Abfahrt ist Spur 8. Spalte 15 ist die Nummer des vorausfahrenden Fahrzeugs, Spalte 16 ist die Nummer des folgenden Fahrzeugs. Hierbei bedeutet eine 0, dass sich kein Auto vor bzw. hinter dem jeweiligen Fahrzeug befindet.

Die Daten sind zunächst nach Fahrzeugen sortiert. Dabei ist das erste Fahrzeug im Datensatz das, was auch zeitlich als erstes registriert wurde. Es folgt das Fahrzeug, was direkt danach auftauchte usw. Es wird also erst ein Auto komplett erfasst, bevor das nächste Fahrzeug im Datensatz auftaucht. Die Daten eines Autos sind dann wiederum zeitlich sortiert. Die Nummern der Autos sind willkürlich gewählt.

2.4 Vorbereitung des Datensatzes für die Auswertung

Bavor der Datensatz weiter verarbeitet wurde, wurden die Nummern der Autos transformiert. Das heißt, das erste Auto im Datensatz trägt die Nummer 1, das letzte die Nummer 4733. Des weiteren wurde der Datensatz in SI-Einheiten umgerechnet.

3 Untersuchung und Korrektur des Original-Datensatzes

3.1 Trajektorien

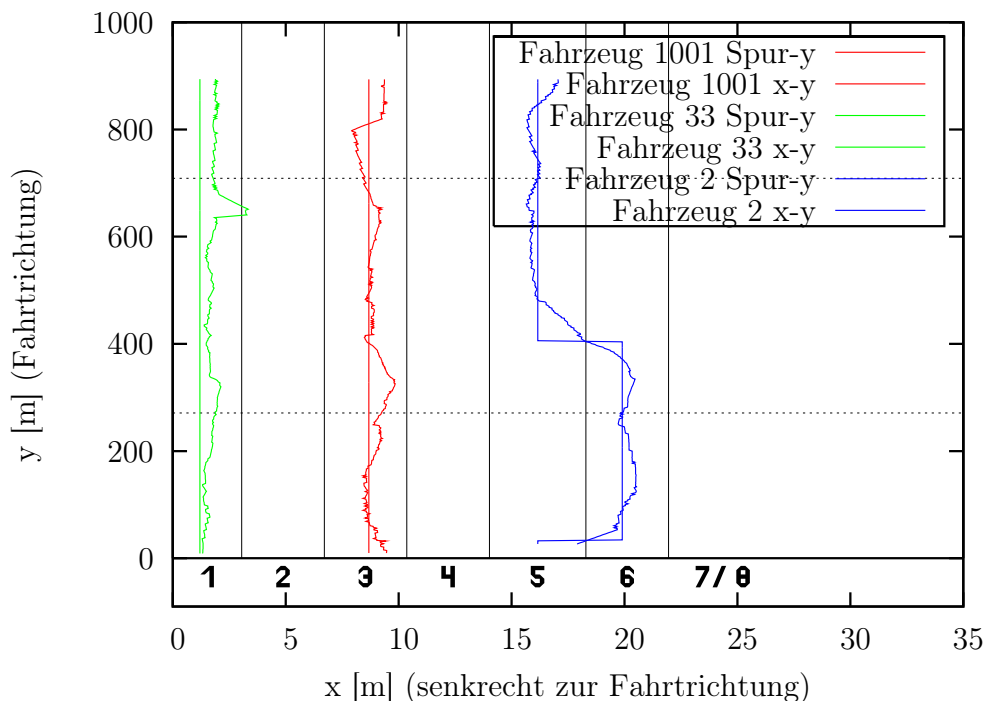


Abb. 3.1: Trajektorien; links: kein Spurwechsel, trotz Grenzübertritt; mitte: kein Spurwechsel; rechts: Spurwechsel bei Grenzübertritt

Wie bereits erwähnt, ist das Interessante an dem Datensatz, dass er Trajektorien-
daten enthält. Die Originaltrajektorie ist zweidimensional und hat die Koordinaten
 $x(t)$ (senkrecht zur Fahrtrichtung) und $y(t)$ (in Fahrtrichtung). Eine solche Trajekto-
rie ist in Abbildung 3.1 (mittig) gezeigt. Bei dieser Trajektorie kommt es zu keinem
Spurwechsel, trotzdem sieht man, dass das Fahrzeug nicht auf einer geraden Linie
fährt. Hierbei kommt ein Problem zum Tragen, dass wir nicht selbst gelöst haben.
Wir haben uns auf die Personen verlassen, die den Datensatz erstellt haben. Wenn
man nur Positionsdaten eines Autos hat, jedoch weiß, dass Spuren auf der Straße

vorhanden sind, muss man sich Gedanken machen, wie man eine Spureinordnung vornimmt. Diese Spureinordnung wurde bereits getätigt und die jeweilige Spur zu jedem Zeitpunkt im Datensatz vermerkt.

Die rechte Trajektorie in Abbildung 3.1 enthält Spurwechsel. Neben den $x - y$ -Trajektorien sind auch *Spur* - y -Trajektorien abgebildet. Hierbei wurde die Spureinordnung des Datensatzes übernommen. Die eingezeichneten Spurgrenzen sind die dem Datensatz zu Grunde liegenden Spurgrenzen, auf die später genauer eingegangen wird. Man sieht, dass Spurwechsel bei Übertritt einer Spurgrenze registriert wurden. Dieses Vorgehen wurde zwar dokumentiert, wenn man jedoch den Algorithmus mit den Daten vergleicht, fällt auf, dass im Algorithmus erwähnte Grenzen nicht mit den wirklich verwendeten Grenzen übereinstimmen. Dies ist ein grober Fehler, der jedoch nicht weiter problematisch ist, da die wirklichen Werte leicht zu finden sind.

Wenn man von Messwerten redet, muss man auch von Messfehlern reden. Diese wurden bereits genannt. Senkrecht zur Fahrtrichtung haben wir einen Fehler von 0,6096 m (2 feet). Es stellt sich die Frage, ob sich dieser Wert auf die Spureinordnung auswirkt und ob dies bei der Erstellung des Datensatzes eine Rolle spielt. Abbildung 3.1 beinhaltet auch eine Trajektorie (links), die zeigt, wie ein Fahrzeug die Grenze zwischen Spur 1 und 2 übertritt, jedoch kein Spurwechsel registriert wurde. Hieran sind zwei Dinge zu erkennen. Zum einen sieht man, dass der beschriebene Algorithmus nicht komplett ist. Es wurden weitere Schritte getätigt, die eine Spureinordnung besser machen. Ob diese Schritte in einem feineren Algorithmus realisiert waren, ist unklar. Zum anderen sieht man, dass es Trajektorien gibt, die sich nicht so einfach einer Spur zuordnen lassen. Im Datensatz gibt es weitere Beispiele, die zeigen, dass auf die Spureinordnung großen Wert gelegt wurde. Es ist zu vermuten, dass die maschinelle Spureinordnung einzeln überprüft und gegebenenfalls nachgebessert wurde.

Bei Betrachtung dieses Sachverhaltes muss man feststellen, dass es keine Möglichkeit gibt, in angemessener Zeit eine eigene Spureinordnung aus den Messdaten durchzuführen. Später wird man sehen, dass dies in begrenztem Bereich jedoch nötig war. Der Datensatz dient als Grundlage für Analysen und Verkehrssimulationen. Da es schwierig ist, die x -Koordinate zu simulieren, ist es sinnvoll, sich auf die y -Koordinate zu konzentrieren und die Spur als Ersatz für die x -Koordinate zu verwenden. In Abbildung 3.2 ist eine Trajektorie der y -Koordinate über der Zeit aufgetragen. Im großen und ganzen sieht man nichts Außergewöhnliches. Auch die Detaildarstellung 3.3 zeigt kein Verhalten, was man nicht erwarten würde. Der Anstieg ändert sich kaum, womit sich die Geschwindigkeit kaum ändert. Analog zur Ortstrajektorie ist es auch möglich, eine Geschwindigkeitstrajektorie zu erstellen, wie sie in Abbildung 3.4 zu sehen ist. Die Geschwindigkeit zeigt starke Schwankungen, über die noch zu reden sein wird. Der grobe analytische Verlauf der Trajektorie sieht jedoch realistisch aus.

Eine dritte Art der Trajektorie kann erstellt werden, wenn man die Beschleunigung darstellt, wie in Abbildung 3.6 zu sehen ist. Diese Beschleunigungswerte sind sehr

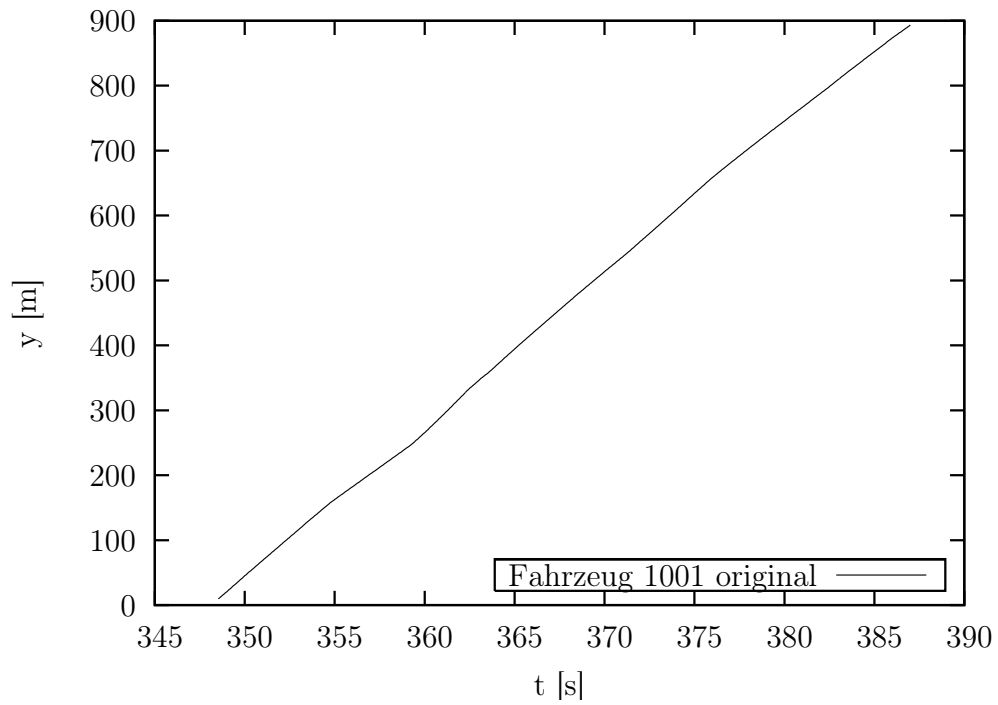


Abb. 3.2: Position in Fahrtrichtung über Zeit aufgetragen

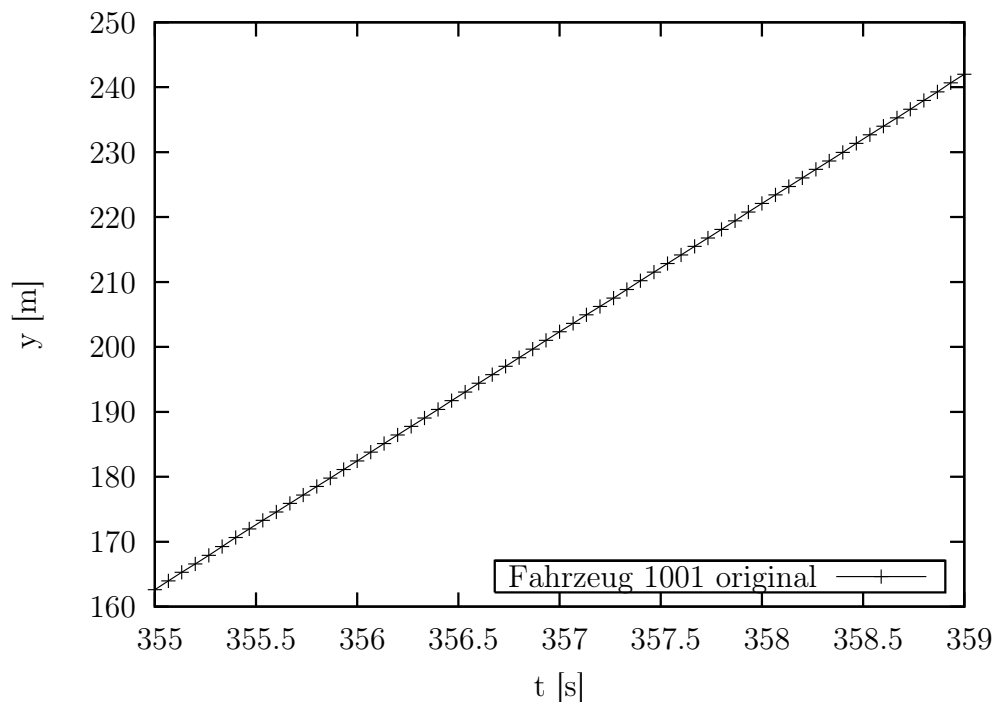


Abb. 3.3: Position in Fahrtrichtung über Zeit aufgetragen; Detaildarstellung

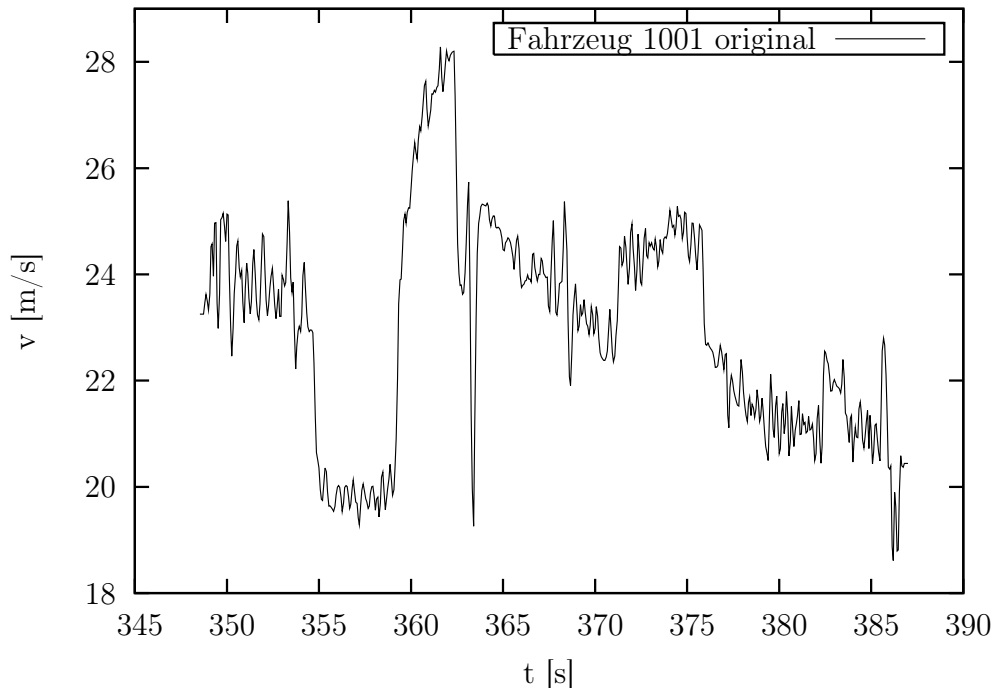


Abb. 3.4: Geschwindigkeit über Zeit aufgetragen

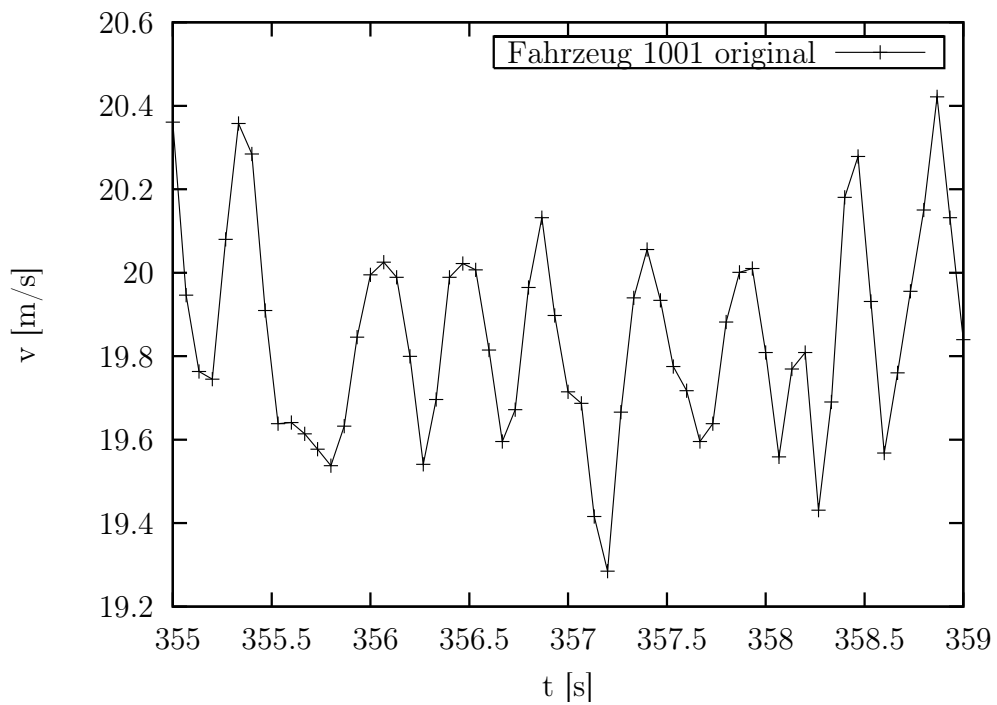


Abb. 3.5: Geschwindigkeit über Zeit aufgetragen; Detaildarstellung

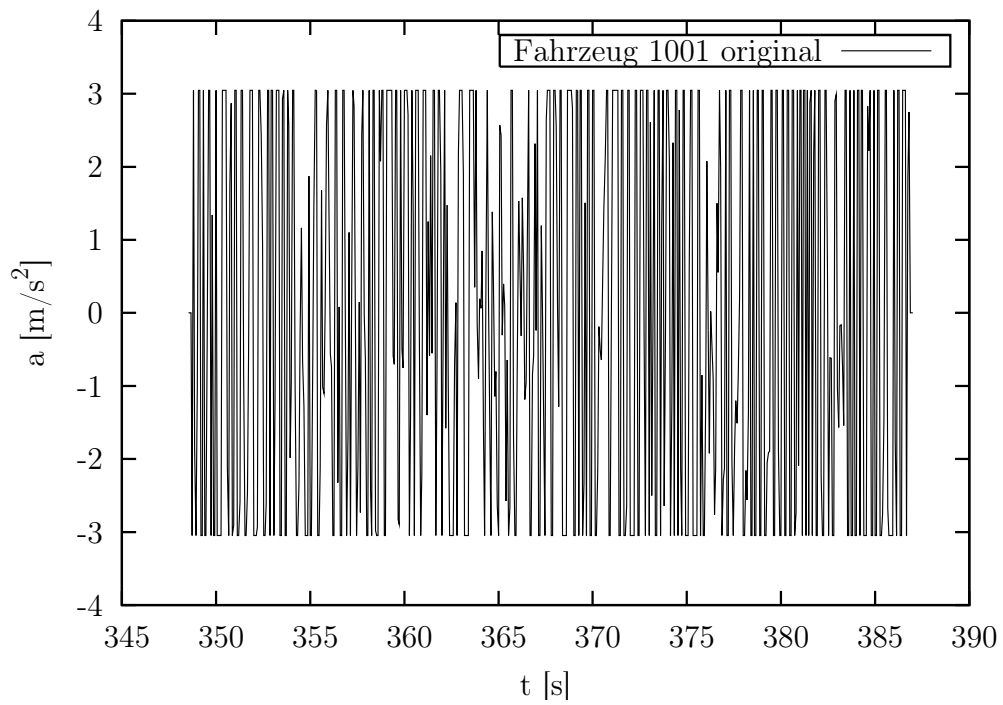


Abb. 3.6: Beschleunigung über Zeit aufgetragen

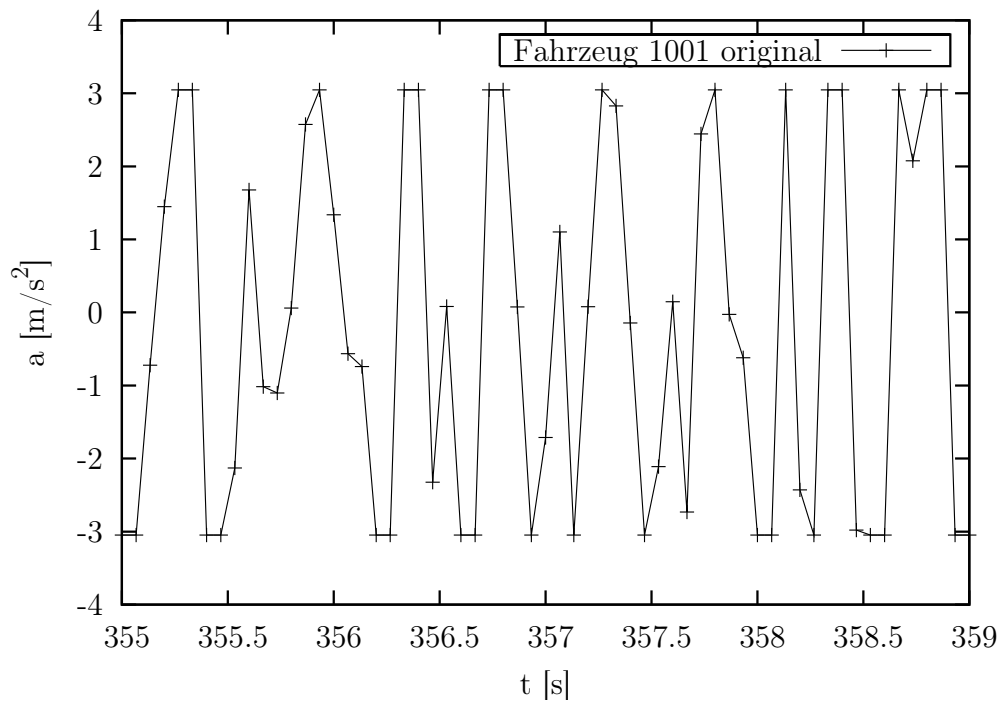


Abb. 3.7: Beschleunigung über Zeit aufgetragen; Detaildarstellung

unrealistisch, worauf jedoch später eingegangen wird.

Die Abbildungen 3.2, 3.4 und 3.6 sind typische Beispiele, wie sie im Datensatz vorkommen.

3.2 Verteilungen

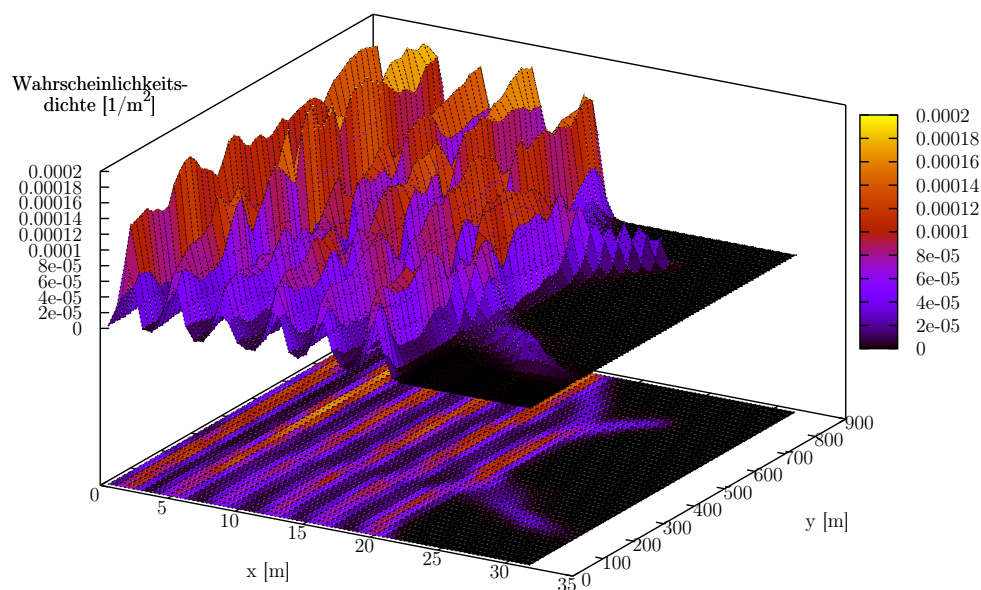


Abb. 3.8: Dichteverteilung der Position (x : senkrecht zur Fahrtrichtung; y : in Fahrtrichtung); Spureinteilung ist gut erkennbar

Neben Trajektorien ermöglichen auch Verteilungen einen Überblick über den Datensatz. Zunächst wurden alle Positionsdatenpunkte aus dem Datensatz extrahiert. Diese Daten können dann als zweidimensionale Dichteverteilung dargestellt werden (siehe Abbildung 3.8). In dieser Darstellung kann man sehr gut die Spuren erkennen.

Als nächstes ist die Geschwindigkeit interessant. In Abbildung 3.9 ist analog zu den Positionsdaten die Geschwindigkeit über der Zeit abgetragen. Man sieht sehr deutlich, dass im letzten Drittel des Datensatzes die Geschwindigkeit abnimmt.

Als drittes wurde die Beschleunigung analog zur Geschwindigkeit ausgewertet. Die Dichte ist jedoch logarithmisch aufgetragen (siehe Abb. 3.10). Man sieht auch hier eine Veränderung im letzten Drittel des Datensatzes. Die Verteilung wird schmaler. Der genutzte Beschleunigungsbereich im dichten Verkehr ist also kleiner.

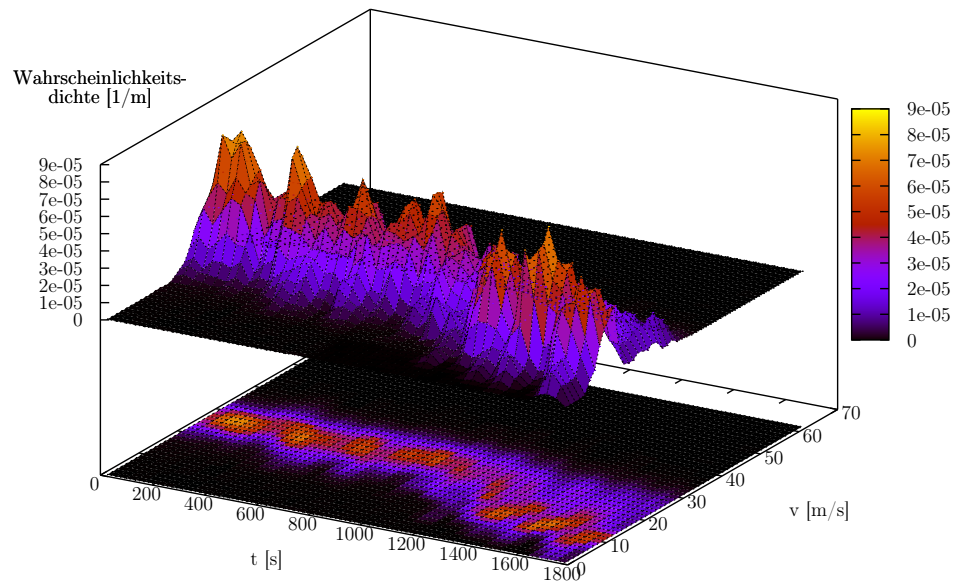


Abb. 3.9: Dichteverteilung der Geschwindigkeit über der Zeit; Geschwindigkeit sinkt im letzten Drittel

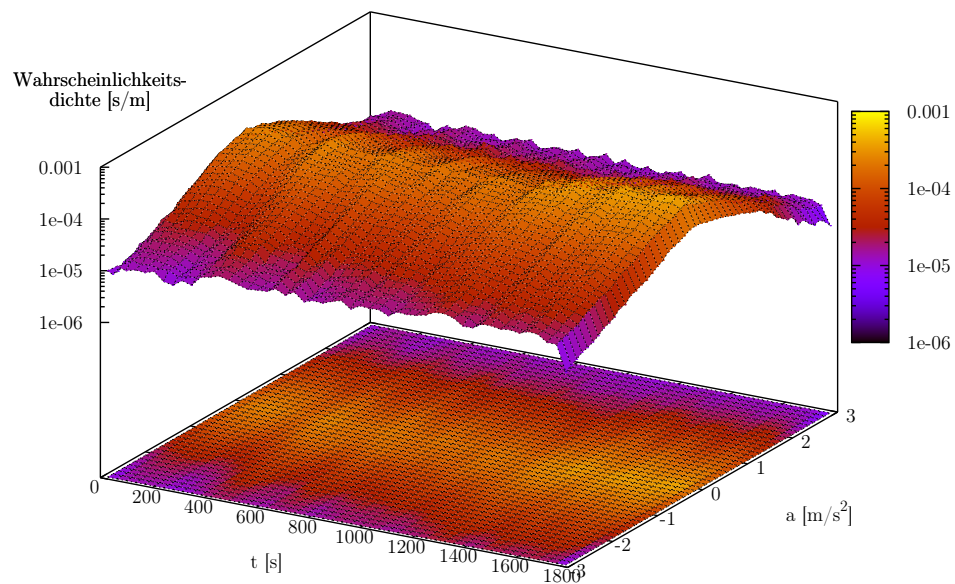


Abb. 3.10: Dichteverteilung der Beschleunigung über der Zeit; Beschleunigungsprofil wird schmaler im letzten Drittel

3.3 Kritik am Datensatz

Es wurde bereits beschrieben, dass der Datensatz äußerst detailliert ist. Es wurde sich nicht nur auf automatische Algorithmen verlassen, es wurden auch nachträglich Korrekturen durchgeführt, wo es nötig war. Trotzdem muss auch Kritik geäußert werden.

3.3.1 Rauschen in den Daten

Dies wird deutlich, wenn man sich den zeitlichen Verlauf der Geschwindigkeit eines Fahrzeugs ansieht (siehe Abbildung 3.4). Man sieht deutliche Schwankungen, die unrealistisch sind und so von keinem Fahrzeug realisiert werden können. Noch deutlicher ist dies bei der Beschleunigung zu erkennen. Hier werden zwei Sachverhalte deutlich. Zum einen wurden die Beschleunigungswerte künstlich begrenzt. Das sieht man daran, dass kein Wert über $3,048 \frac{\text{m}}{\text{s}^2}$ ($10 \frac{\text{feet}}{\text{s}^2}$) vorhanden ist. Zum anderen sieht man, dass die Beschleunigungswerte nicht den Erfahrungen des Alltags im Verkehr entsprechen. In der Detaildarstellung kann man innerhalb von vier Sekunden 18 Wechsel zwischen maximaler Beschleunigung und maximaler Verzögerung feststellen. Im Allgemeinen fährt man jedoch mit konstanter Geschwindigkeit oder geringen Beschleunigungswerten. Der Grund für die schlechten Beschleunigungswerte liegt sicher in den stark schwankenden Geschwindigkeitswerten, welche wiederum aus schlecht gemessenen Positionsdaten resultieren. Eine Glättung der Daten wird später beschrieben.

3.3.2 Falsche Spureinordnungen

Abbildung 3.11 zeigt zwei interessante Trajektorien. Das Fahrzeug Nummer 38 wechselt zwei mal nach links die Spur. Beide Spurwechsel werden zu einem Zeitpunkt registriert, als sich das Fahrzeug noch klar und deutlich auf der alten Spur befand. Die Auffahrtsspur scheint in der Analyse der Videodaten sehr früh zu enden, wesentlich früher als es die Trajektorien vermuten lassen, da es viele solcher Trajektorien gibt und alle auf die gleiche Weise ausgewertet wurden. Analog dazu scheint die Spur 6 ebenfalls zu kurz zu sein, wie der zweite Spurwechsel zeigt.

Das Fahrzeug Nummer 1 zeigt den dritten Fall, bei dem die Spureinordnung prinzipiell falsch ist. Das Fahrzeug wechselt bei seinem dritten Spurwechsel von Spur 6 auf die Abfahrtsspur. Dies tut es jedoch rund 65 m vor der Registrierung des Spurwechsels.

Alle drei Fälle sind prinzipieller Natur. Das heißt, es wurden keine Trajektorien übersehen, sondern sie wurden systematisch so ausgewertet. Diese systematischen Fehler müssen korrigiert werden. Eine sehr anschauliche Konsequenz liefert der Fall der zu kurzen Auffahrtsspur. Wenn man die Spureinordnung so lassen würde und eine Simulation schreiben würde, die die Verkehrssituation wiedergeben soll, müsste

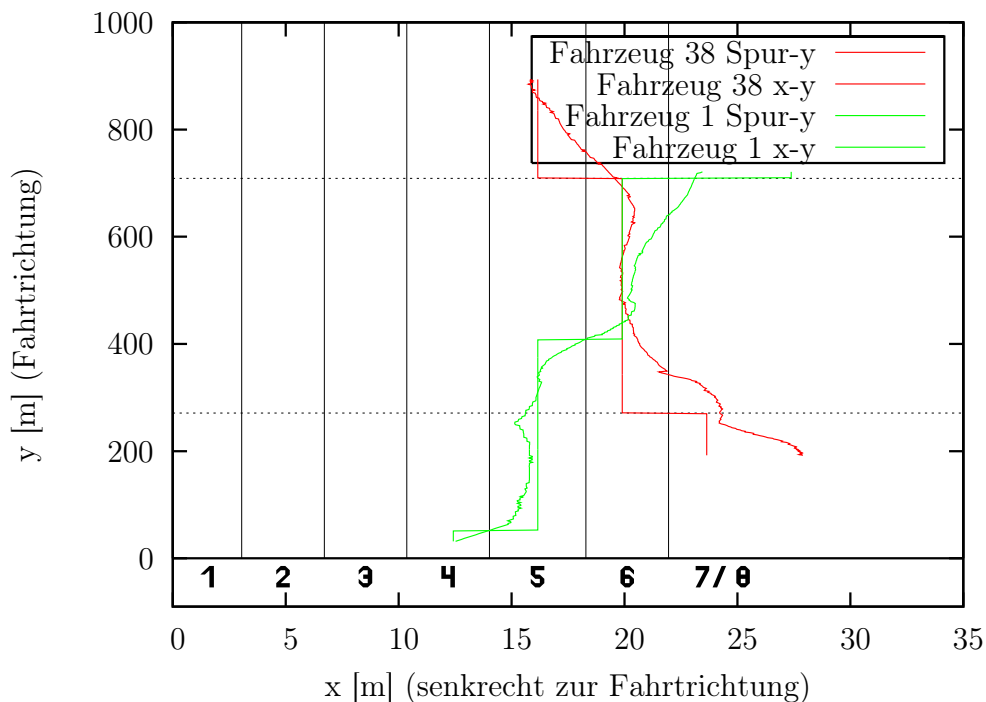


Abb. 3.11: Trajektorien; Fehler bei der Spureinordnung im Datensatz

man sich Gedanken um die Wechselbereiche machen. Das heißt, man müsste festlegen, ab wann man beispielsweise ein Fahrzeug von der Auffahrtsspur auf die Spur 6 wechseln darf. Dieser Bereich würde im Falle der Auffahrtsspur sehr viel kleiner ausfallen. In der Simulation wäre mit Staus in diesem Bereich zu rechnen, da nicht genug Strecke für einen Spurwechsel vorhanden wäre. Die Länge des besagten Wechselbereiches wird bei dieser Korrektur um einen Faktor 3 verlängert.

Insgesamt kann man sagen, dass die Spureinordnung sehr präzise, jedoch an drei Stellen schlicht falsch erfolgte.

3.4 Glätten der Daten

3.4.1 Der Savitzky-Golay-Filter

Wie im letzten Abschnitt erwähnt, sind die Originaldaten sowohl für die Geschwindigkeit als auch für die Beschleunigung im Datensatz physikalisch unsinnig. Die Konsequenz muss deshalb sein, diese Daten neu zu berechnen. Dabei sei erwähnt, dass man nur die Positionsdaten als Messwerte ansehen kann. Alle anderen Werte im Datensatz sind abgeleitete Werte, deren Art der Erstellung nicht geklärt ist. Deshalb werden die Daten für die Geschwindigkeit und die Beschleunigung neu berechnet.

Die momentane Geschwindigkeit ist die erste zeitliche Ableitung des Ortes. Die

Ortsdaten liegen als zeitlich diskretisierte Werte vor. Diese sind jedoch fehlerbehaftet ($\pm 1,2192 \text{ m} = \pm 4 \text{ feet}$ in Fahrtrichtung, $\pm 0,6096 \text{ m} = \pm 2 \text{ feet}$ senkrecht zur Fahrtrichtung) und müssen vor einer Ableitung geglättet werden. Die Fehlerangaben sind aus der Dokumentation des Datensatzes entnommen und können nicht verifiziert werden. Wenn man jedoch die Originalbilder der Kameras (Abbildung 2.2) betrachtet, muss man feststellen, dass beispielsweise die Länge eines LKWs stark unterschätzt wurde. Damit entsteht nicht unbedingt ein großer Fehler in den Positionsdaten, da diese auf der Position der vorderen Stoßstange beruhen. Allerdings sind abgeleitete Größen wie der Abstand dann stark verfälscht. Der Abstand ist meist die interessantere Größe im Vergleich zur absoluten Position. Somit ist wohl von einem größeren Fehler, als in der Dokumentation angegeben, auszugehen.

Bei der Glättung von experimentellen, fehlerbehafteten Daten sind verschiedene Algorithmen möglich. Ein gleitender Mittelwert beispielsweise würde die Bedeutung eines einzelnen Wertes abschwächen. Wenn man jedoch eine Funktion mit einem klaren Maximum betrachtet, wird das Maximum immer als kleiner gewertet, als dies eigentlich der Fall ist. Dies lässt sich dadurch verhindern, dass man die einbezogenen Werte wichtet. Werte, die dicht bei dem betrachteten Punkt liegen, bekommen ein größeres Gewicht als Werte, die weiter weg liegen. Dabei kann man verschiedene Filter in Form solcher Gewichte erstellen, die jeweils anders auf bestimmte Messwertverläufe reagieren. Bei einer einzelnen Messung kann man sich so einen Filter schaffen, der die Messwerte möglichst gut glättet. Es kann jedoch zu Problemen kommen, wenn man zunächst nichts über seine Messwerte weiß, bzw. man viele Messreihen hat, die auszuwerten sind. Letzteres ist der Fall, wenn man bedenkt, dass 4733 Trajektorien ausgewertet werden sollen.

Ein Filter, der sich in vielen solchen Szenarien bewährt hat, ist der Savitzky-Golay-Glättungs-Filter [10], der es in unserem Fall erlaubt, die Wichtung durch einen Satz von m Koeffizienten c_i im Vorfeld festzulegen. Der Savitzky-Golay-Filter ist ein digitaler Filter, der es ermöglicht, aus der Analyse der Daten im Zeit-Raum eine Glättung vorzunehmen. Dabei gilt allgemein die Formel:

$$g_i = \sum_{n=-n_L}^{n_R} c_n f_{i+n} . \quad (3.1)$$

f_{i+n} sind die Original- und g_i die geglätteten Werte. Ferner muss gelten, dass die Summe der Faktoren gleich 1 ist,

$$\sum_{n=-n_L}^{n_R} c_n = 1 . \quad (3.2)$$

Dabei stellt n_L die Anzahl der Punkte zur linken und n_R zur rechten Seite dar. In unserem Fall haben wir uns für einen symmetrischen Filter entschieden, wobei wir $n_L = n_R = 7$ gesetzt haben, um eine Mittelung über eine Sekunde zu erhalten. Dieser Wert hat sich als günstig erwiesen, beruht aber nicht auf tieferen Untersuchungen.

Der Savitzky-Golay-Filter geht davon aus, dass Messwerte durch ein Polynom n -ter Ordnung gefittet werden können. Das Polynom wird so berechnet, dass die mittlere quadratische Abweichung minimal wird. Wenn man beliebig verteilte Messwerte hat, erhält man über diesen Algorithmus für jeden Messwert im Intervall einen Faktor. Die Summe aus den somit gewichteten Messwerten ergibt den geglätteten Messwert selbst. Dieser Algorithmus ist recht aufwendig, wenn man viele beliebig verteilte Messwerte glätten will, vereinfacht sich jedoch sehr stark, wenn man äquidistante Messwerte hat. In unserem Fall wird ein festes Zeitintervall durch die Kameras vorgegeben. Wenn dies der Fall ist, werden die Faktoren von den eigentlichen Messwerten unabhängig und können im Vorfeld für eine bestimmte Polynomordnung n und eine feste Anzahl von linken und rechten Messwerten n_L und n_R berechnet werden. Damit ist es möglich, einen sehr schnellen und einfach zu implementierenden Algorithmus zu kreieren, der eine Glättung der Positionsdaten ermöglicht.

3.4.2 Glättung der Positionsdaten

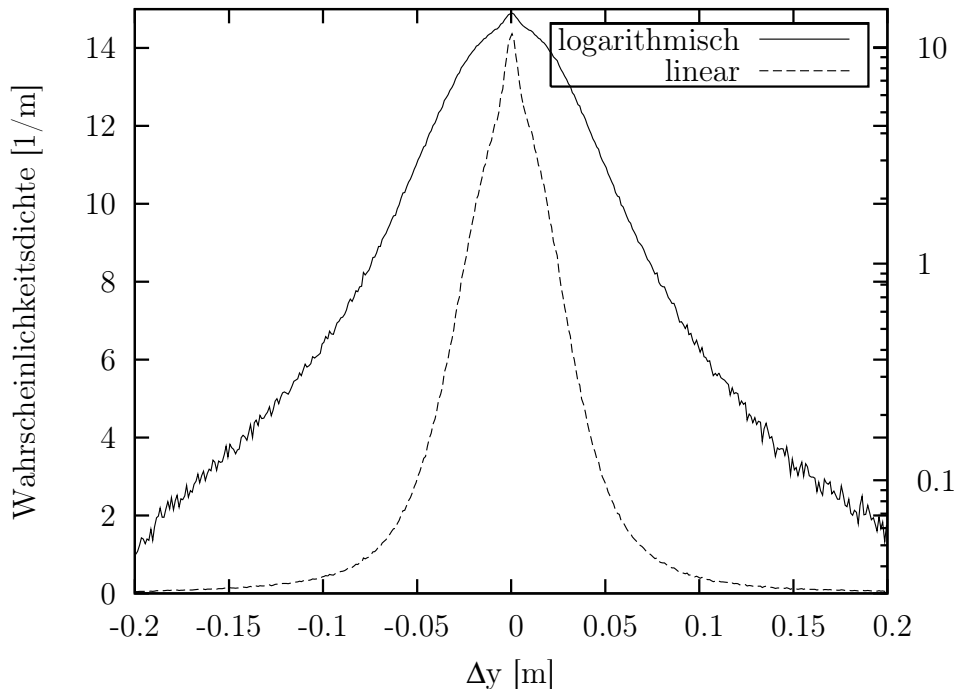


Abb. 3.12: Abweichungsverteilung bei der Ortsdaten-Glättung mit dem Savitzky-Golay-Filter

Die Ortsdaten wurden 2-dimensional erfasst. Wenn man Ortsdaten glättet, müsste man dies beachten. Wie bereits erwähnt, sind die Ortsdaten senkrecht zur Fahrtrichtung recht unzuverlässig. Der Winkel zwischen realer Fahrtrichtung und Fahrbahn

ist zusätzlich sehr gering, so dass es durchaus reicht, sich komplett auf die Positionsdaten in Fahrtrichtung zu konzentrieren. Diese Ortsdaten werden mit dem Savitzky-Golay-Filter wie oben beschrieben geglättet. Ein Problem ergibt sich an den Rändern, wo man keine 7 Messwerte abseits des betrachteten Punktes zur Berechnung hat. Hier wird ein symmetrisches Intervall kleinerer Größe erstellt, die Filter-Koeffizienten berechnet und ausgewertet. Die beiden Extremfälle am Anfang und am Ende des Datensatzes werden demnach unverändert übernommen.

In Abbildung 3.12 ist die Verteilung der Abweichung zwischen den Messwerten und den geglätteten Werten der Positionsdaten in Fahrtrichtung aufgetragen. Man kann erkennen, dass der größte Teil der Verteilung innerhalb der angegebenen Fehlergrenzen liegt. Genauer gesagt liegen 99,36 % der geglätteten Werte innerhalb der angegebenen Messfehler. Dies ist wichtig zu betrachten, da eine Glättung der Werte diese nicht zu stark ändern bzw. verfälschen darf. Wenn man bedenkt, dass einem Fehlerbereich immer auch ein Vertrauensbereich zu Grunde liegt, kann man davon ausgehen, dass die Glättung die Werte nicht verfälscht. Interessant an der Verteilung ist, dass sie im Bereich um den Nullpunkt spitzer wird. Ob dies an den Daten selbst oder am Savitzky-Golay-Filter liegt, ist unklar.

3.4.3 Glättung der Geschwindigkeitsdaten

Der Savitzky-Golay-Filter ist nicht nur in der Lage, Daten zu glätten. Man kann auch direkt die Ableitung der geglätteten Daten bestimmen. Die Vorgehensweise ist die gleiche. Man erhält einen Satz Konstanten, den man mit den Werten multipliziert und bildet die Summe. Des weiteren muss man hierbei noch durch das Zeitintervall dividieren. Es ergibt sich also die Gleichung

$$v_i = \frac{\sum_{n=-n_L}^{n_R} \tilde{c}_n f_{i+n}}{\Delta t} . \quad (3.3)$$

Auch hier wurde das Intervall an den Rändern verkleinert. An den Randpunkten wurde der entsprechende Wert aus dem Datensatz selbst genommen. Die Abbildungen 3.13 und 3.14 zeigen das Ergebnis exemplarisch an der Geschwindigkeitstrajektorie des Fahrzeugs Nummer 1001.

3.4.4 Glättung der Beschleunigungsdaten

Wenn der Grad des angenommenen Polynoms groß genug ist, kann man beliebig hohe Ableitungen der geglätteten Daten bilden. Wir haben uns für ein Polynom 2-ter Ordnung entschieden. Eine zweite Ableitung war folglich problemlos möglich. Es musste jedoch darauf geachtet werden, dass bei der zweiten Ableitung die Faktoren mit 2 zu multiplizieren waren. Allgemein gesagt muss man mit $n!$ multiplizieren, wenn man die n . Ableitung bilden will. Des weiteren muss man das Ergebnis durch

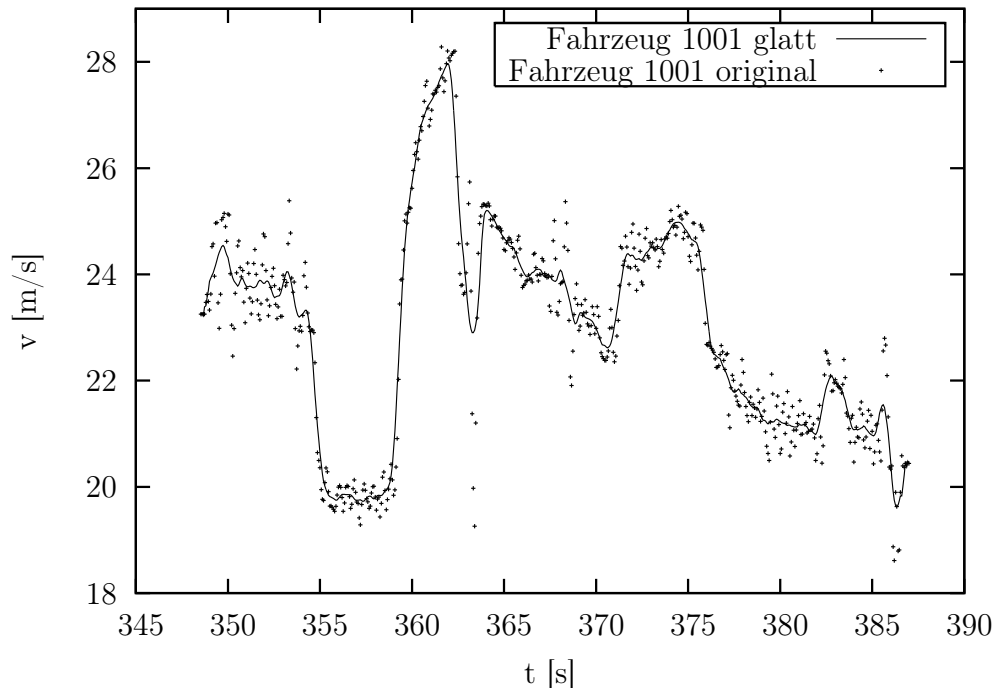


Abb. 3.13: Geschwindigkeit über Zeit aufgetragen; geglättet

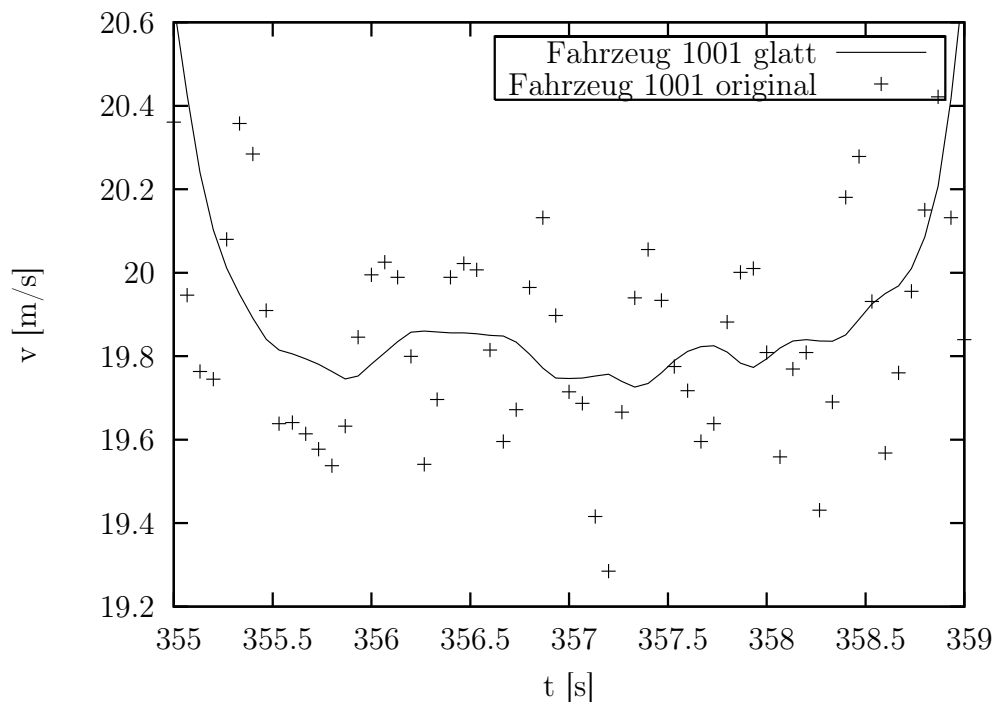


Abb. 3.14: Geschwindigkeit über Zeit aufgetragen; Detaildarstellung; geglättet

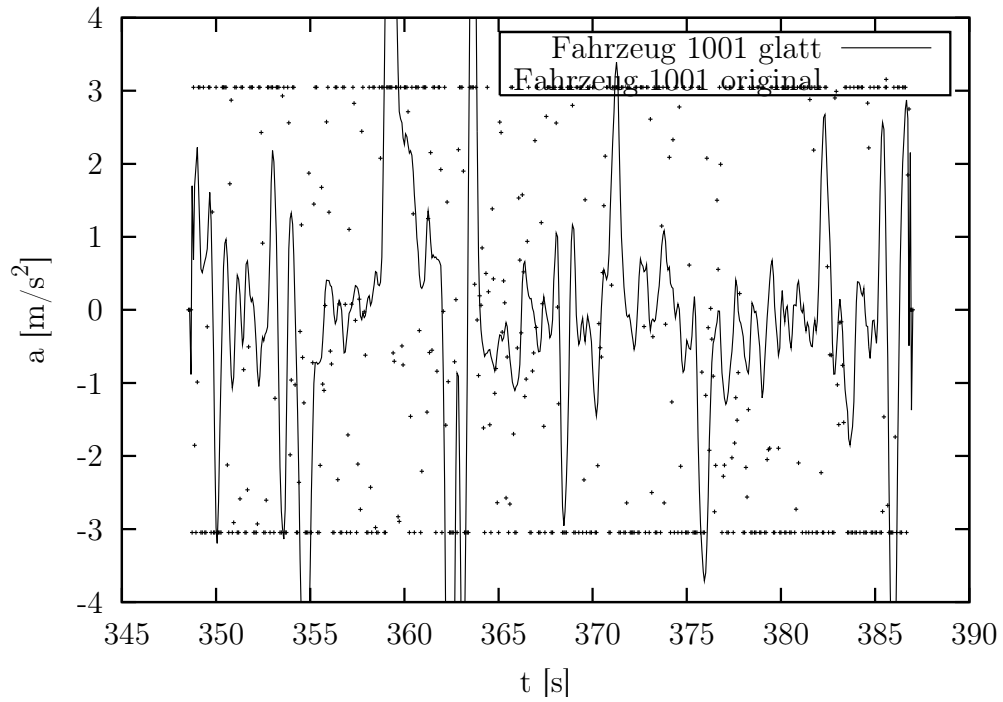


Abb. 3.15: Beschleunigung über Zeit aufgetragen; geglättet

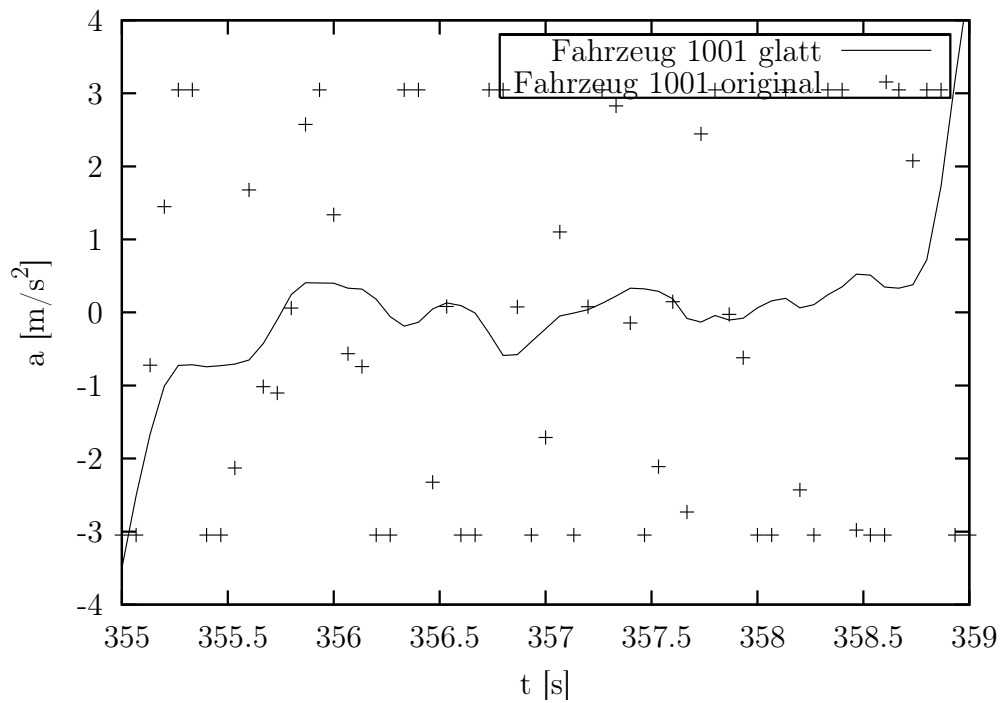


Abb. 3.16: Beschleunigung über Zeit aufgetragen; Detaildarstellung; geglättet

das Quadrat des Zeitintervalls dividieren. Folglich ergibt sich die Gleichung

$$a_i = \frac{\sum_{n=-n_L}^{n_R} \hat{c}_n f_{i+n}}{\Delta t^2} . \quad (3.4)$$

Die Randwerte wurden analog zu den Positions- und Geschwindigkeitswerten behandelt. Die Abbildungen 3.15 und 3.16 illustrieren das Ergebnis anhand des Fahrzeugs Nummer 1001.

Somit ist es möglich, einen neuen Datensatz zu erstellen. In diesen neuen Datensatz werden die Original-Positionsdaten aufgenommen. Die Geschwindigkeits- und Beschleunigungswerte gelangen in geglätteter Form in den Datensatz. Der Grund dafür ist, dass Positionsdaten als Original-Messwerte aufzufassen sind, die man nicht ändern sollte. Andere Werte im Datensatz sind abgeleitete Werte und können selbst erstellt werden.

3.5 Spureinordnung

Aus den bereits genannten Gründen ist es nötig, die Spuren neu einzuordnen. Hierbei wurden fünf Veränderungen vorgenommen, wovon drei allgemeiner Natur sind und zwei jeweils ein einzelnes Fahrzeug betreffen.

Bei einigen Fahrzeugen, die über die Spur 7 auf den Highway auffahren, muss die Spur korrigiert werden. Dies betrifft die Fahrzeuge, die vom linken Fahrbahnrand weiter als 21,9456 m (72 feet) entfernt und trotzdem auf Spur 6 eingeordnet sind. Dies wurde korrigiert und diese Fahrzeuge der Spur 7 zugewiesen. Ein Spurwechsel von Spur 6 auf Spur 7 ist nicht möglich, da Spur 7 die Auffahrt ist und es keinen Sinn macht, auf diese Spur zu wechseln. Im Datensatz sind Datenpunkte zu finden, die sich rechts von besagter Linie befinden, obwohl sie sich bereits links davon befanden. Dies wird nicht als Spurwechsel interpretiert, es sei denn, ein Spurwechsel auf Spur 8 hat stattgefunden. Insgesamt wird also nach dem ersten eindeutigen Spurwechsel von Spur 7 nach Spur 6 gesucht. Dieser Spurwechsel wird anhand der Position des Fahrzeugs senkrecht zur Fahrtrichtung identifiziert. Ein Beispiel für diese Korrektur ist das Fahrzeug 38 in den Abbildungen 3.11 (original) und 3.17 (korrigiert).

Bei der Korrektur des Spurwechsels von Spur 6 nach Spur 8 wurde ein analoger Algorithmus angewendet. Hier wurde allerdings der letzte eindeutige Spurwechsel gesucht und nicht der erste. Die Grenze lag wieder bei 21,9456 m. Das Fahrzeug Nummer 1 in den Abbildungen 3.11 (original) und 3.17 (korrigiert) illustriert diese Korrektur.

Als dritte prinzipielle Korrektur wurde der Spurwechsel von Spur 6 nach Spur 5 betrachtet. Hierbei wurden alle Autos, die sich jenseits der Grenze von 708,66 m (2325 feet) in Fahrtrichtung und rechts von der Grenze von 18,288 m (60 feet) senkrecht zur Fahrtrichtung befinden der Spur 6 zugeordnet. Auch hier ist das Fahrzeug 38 in den Abbildungen 3.11 (original) und 3.17 (korrigiert) ein gutes Beispiel.

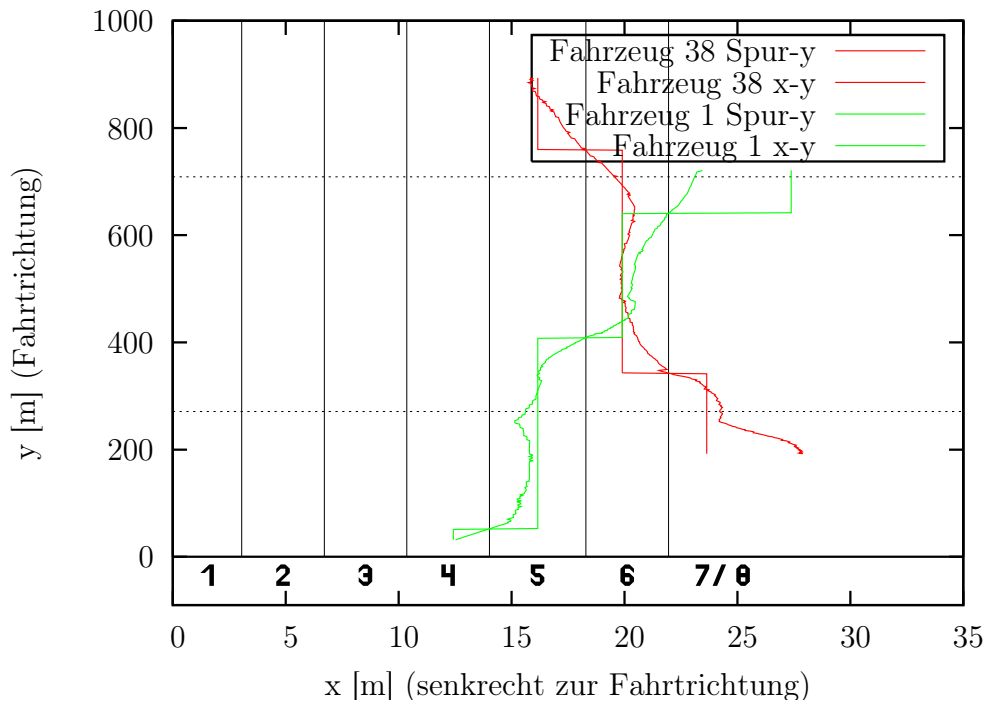


Abb. 3.17: Trajektorien; korrigierte Fehler bei der Spureinordnung im Datensatz

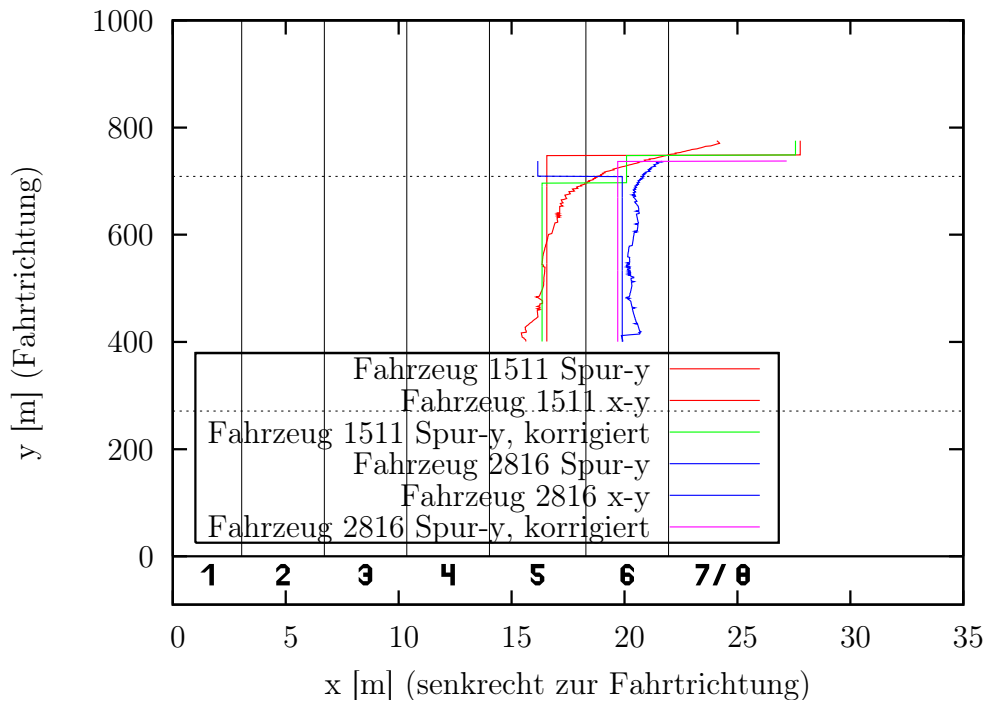


Abb. 3.18: Trajektorien; Fehler bei der Spureinordnung im Datensatz; Korrekturen

Das Fahrzeug mit der Nummer 1511 (siehe Abbildung 3.18) bedarf einer speziellen Untersuchung. Dieses Fahrzeug wechselt im Datensatz direkt von Spur 5 nach Spur 8. Dies sollte eigentlich nicht vorkommen. Wenn man sich die Trajektorie genau betrachtet, sieht man, dass der Fahrer in der Tat sehr schnell von Spur 5 nach Spur 8 wechselt, allerdings auf Spur 6 auch eine gewisse Zeit einzuordnen wäre. Der Grund, warum dies nicht geschehen ist, liegt in der falschen Einordnung der Spur 8, die bereits besprochen wurde. Die Einordnung wurde in der angegebenen Weise korrigiert

Die Trajektorie des Fahrzeugs 2816 (siehe Abbildung 3.18) endet laut Datensatz eigentlich auf Spur 6. Das heißt, es wurde kein Spurwechsel auf Spur 5 registriert. Allerdings zeigt die Trajektorie eindeutig, dass ein Spurwechsel kurz bevor stand. Aus diesem Grund wurde der letzte Datenpunkt auf der Trajektorie auf Spur 8 gelegt. Dies hat später in der Simulation Konsequenzen, wenn es darum geht, die Zielspur des Fahrzeugs zu berücksichtigen.

3.6 Konsequenzen

Im Datensatz waren die Daten zueinander konsistent, dass heißt, wenn ein Fahrzeug ein anderes Fahrzeug als Vordermann hat, war dies auch anhand der Positionsdaten nachvollziehbar. Da nun der Datensatz aber geändert wurde, muss überprüft werden, ob die Daten immer noch konsistent sind.

Bei der Glättung der Daten wurden die Original-Positions-Daten in den Datensatz geschrieben. Geändert wurden letztendlich nur die Daten für Geschwindigkeit und Beschleunigung des Fahrzeugs. Diese Daten haben auf andere Daten keinen Einfluss.

Anders sieht es bei der Spureinordnung aus. Wenn ein Fahrzeug seine Spur ändert, ändern sich zwangsläufig Vorder- und Hintermänner anderer Fahrzeuge. Deshalb war es nötig, diese Einordnung zu überprüfen und eventuell zu korrigieren.

Dies alles wurde überprüft und gegebenenfalls korrigiert. Das Ergebnis ist ein in sich wieder konsistenter Datensatz, der als Ersatz für die Originaldaten dient.

4 Auswertung des korrigierten Datensatzes

4.1 Fundamentaldiagramme

Bei der Untersuchung des Straßenverkehrs spielt das Fundamentaldiagramm eine wichtige Rolle. Das Fundamentaldiagramm ist eine Abtragung des Verkehrsflusses j (Anzahl der Autos, die pro Zeit eine bestimmte Stelle passieren) über der Dichte ρ (Anzahl der Fahrzeuge in einem bestimmten Fahrbahnabschnitt).

Dies führt im freien Verkehr zu einer annähernd linearen Beziehung, da bei einer erhöhten Dichte mehr Fahrzeuge die betrachtete Stelle passieren. Im freien Verkehr kann man davon ausgehen, dass jedes Fahrzeug annähernd seine Höchstgeschwindigkeit fährt. Bei größeren Verkehrsdichten ist diese Annahme jedoch nicht mehr legitim. Die Fahrzeuge werden ihre Geschwindigkeit reduzieren, der Fluss steigt nicht mehr linear mit der Dichte. In diesem Fall spricht man von congested flow, was soviel heißt wie überfüllter oder verkehrsreicher Fluss. Dies ist vergleichbar mit dem Übergang eines Gases in eine Flüssigkeit bzw. von einem idealen zu einem realen Gas mit Wechselwirkung.

Fundamentaldiagramme haben die interessante Eigenschaft, dass sie relativ einfach über Messschleifen erstellt werden können. In dem vorliegenden Datensatz sind wesentlich mehr Informationen enthalten, als durch Messschleifen messbar wären. Allerdings eignet sich der Datensatz dazu, eine solche Messmethode zu simulieren.

In Abbildung 4.1 ist das Ergebnis einer solchen Messsimulation dargestellt. Hierfür wurde ein Intervall der Länge $L = 300$ m in der Mitte der Straße, also zwischen 300 und 600 m untersucht. Es wurde für einen Messpunkt die mittlere Dichte im Intervall und der Fluss an der Messstelle bei 450 m über ein Zeitintervall von $T = 30$ s ermittelt. Es wurde jeweils über alle Spuren gemessen. Dies ergibt 60 Messwerte. Eine Steigerung der Anzahl der Messwerte wäre möglich, indem man mehr Messschleifen simuliert oder die Zeitintervalllänge verringert.

Abbildung 4.1 zeigt in den ersten 20 Minuten ein lineares Verhalten, was auf freien Verkehr schließen lässt. In den letzten 10 Minuten verändert sich das Verhalten. Es entsteht eine Punktwolke, die keinem mathematischen Zusammenhang folgt. Die Werte sind unkorreliert.

Bei der Erstellung dieser Fundamentaldiagramme ergeben sich zwei Probleme. Zum einen kann man relativ wenig Messpunkte ermitteln, was eine Auswertung der Daten erschwert. Zum anderen versagt die Messmethode bei sehr dichtem Verkehr.

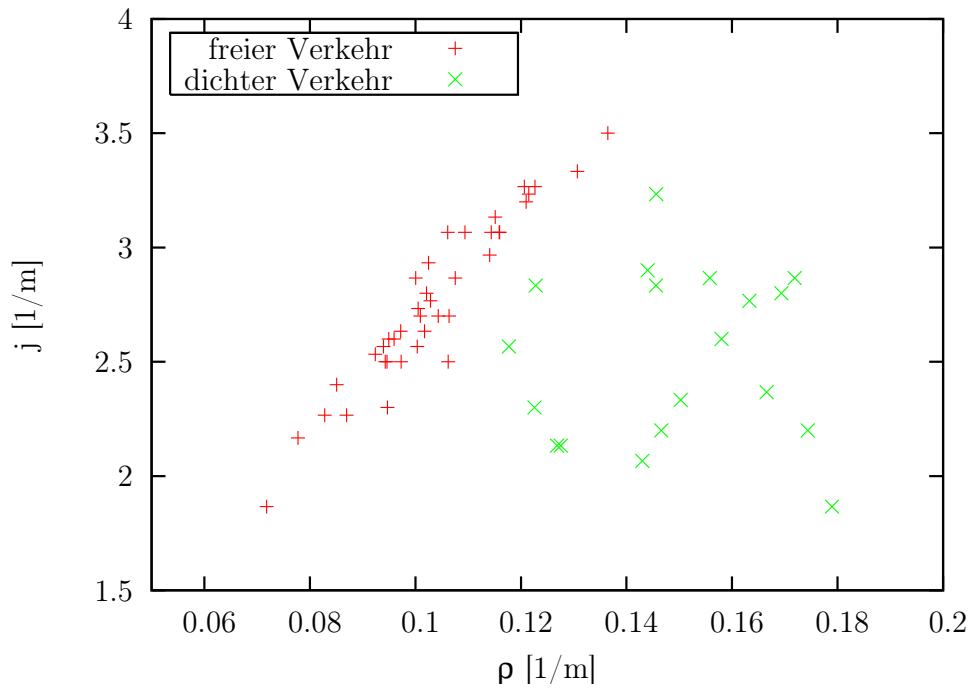


Abb. 4.1: makroskopisches Fundamentaldiagramm; Verkehrsflussdichte über Verkehrsdichte; kompletter korrigierter Datensatz

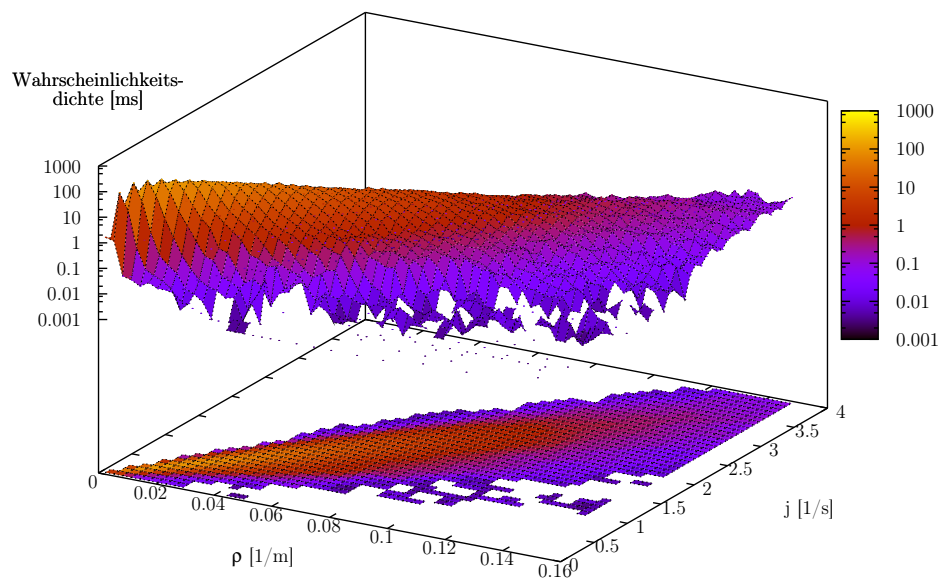


Abb. 4.2: mikroskopisches Fundamentaldiagramm; komplette Zeit; korrigierter Datensatz

In einem Stau oder sehr zähfließendem Verkehr ist es nur noch schwer möglich, einen Verkehrsfluss zu ermitteln. In einer simulierten Messung mag dies noch möglich sein. Eine reale Messung wird jedoch aufgrund der Induktionsschleifen nicht mehr möglich sein. Hier kann der große Vorteil der Datensatzes ausgespielt werden.

Wenn zu jedem Zeitpunkt alle Informationen eines jeden Fahrzeugs zugänglich sind, eröffnet dies neue Möglichkeiten und eine andere Form von Fundamentaldiagramm. Die bereits beschriebene Form des Fundamentaldiagramms beruht auf makroskopischen Größen wie der Dichte und des Flusses, kann also als makroskopisches Fundamentaldiagramm bezeichnet werden. Da wir hier jedoch eine Art von mikroskopischen Daten zur Verfügung haben, kann man auch über ein mikroskopisches Fundamentaldiagramm nachdenken.

Anstatt der Dichte kann man das Reziproke des Abstandes zum Vordermann verwenden und erhält somit eine lokale Dichte. Das Produkt aus der so ermittelten Dichte und der Geschwindigkeit des betrachteten Fahrzeugs gibt den Fluss eines Fahrzeugs an. Damit hat man einen Punkt im Fundamentaldiagramm aus den Daten eines einzelnen Fahrzeugs gewonnen, sofern dieses einen Vordermann besitzt, um die Dichte zu berechnen. Dies führt zu einer massiven Erhöhung der Messpunkte, was auch die Betrachtung von kleinen Zeit- und Streckenintervallen ermöglicht.

Bei der Menge an Messpunkten macht eine Darstellung der Einzelpunkte keinen Sinn. Eine Darstellung der Wahrscheinlichkeitsdichte eines bestimmten Intervalls ist hier sinnvoller.

Abbildung 4.2 zeigt ein solches Diagramm für den kompletten Datensatz. Das heißt, das Diagramm beinhaltet alle Spuren über die komplette Länge und den kompletten Zeitraum der Messung. Die weiteren Abbildungen 4.3 bis 4.5 zeigen Fundamentaldiagramme verschiedener Zeitabschnitte. Bei allen Diagrammen wurde eine Normierung vorgenommen. Das heißt, eine Integration über beide Variablen ergibt 1. Die Diagramme sind des weiteren beschnitten. Das heißt, es wurden auch Werte weit außerhalb des dargestellten Intervalls registriert. Diese Werte gingen in die Normierung ein. Dies ist bei späteren Betrachtungen wichtig, wenn Fundamentaldiagramme aus Simulationen betrachtet werden, die auch signifikant viele Werte außerhalb des betrachteten Intervalls liefern. Die Normierung bezieht sich immer auf alle registrierten Werte.

4.2 Dichteverlauf

Eine wichtige Größe in der Verkehrsforschung ist die Dichte ρ , das heißt wie viele Fahrzeuge sich in einem bestimmten Intervall befinden. Abbildung 4.6 zeigt die Anzahl der Fahrzeuge über der Zeit in Bezug auf die Maximalzahl im Datensatz. Man kann auch hier sehr gut erkennen, dass sich die Situation auf der Straße in den letzten 10 Minuten ändert. Dies sollte die Simulation reproduzieren können.

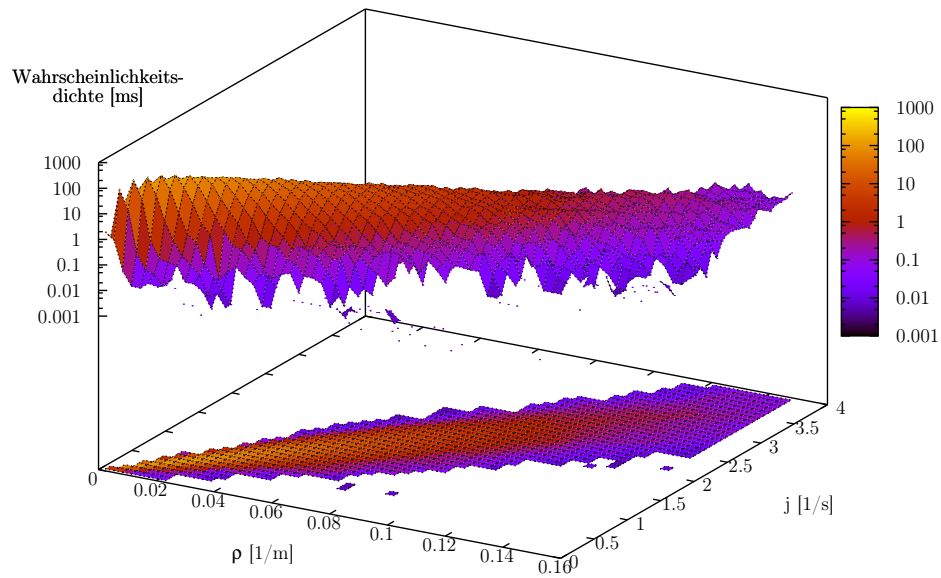


Abb. 4.3: *mikroskopisches Fundamentaldiagramm der ersten 10 Minuten; korrigierter Datensatz*

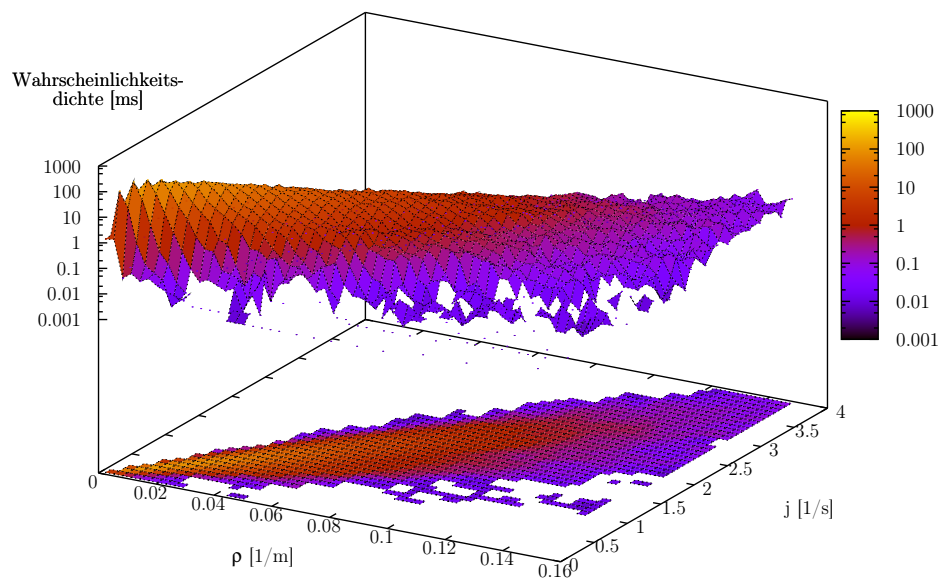


Abb. 4.4: *mikroskopisches Fundamentaldiagramm der mittleren 10 Minuten; korrigierter Datensatz*

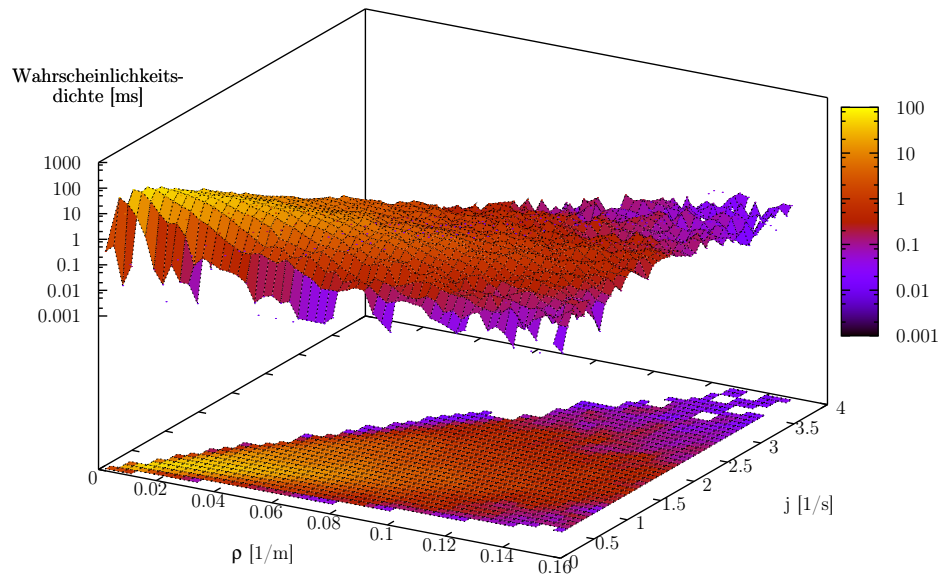


Abb. 4.5: *mikroskopisches Fundamentaldiagramm der letzten 10 Minuten; korrigierter Datensatz*

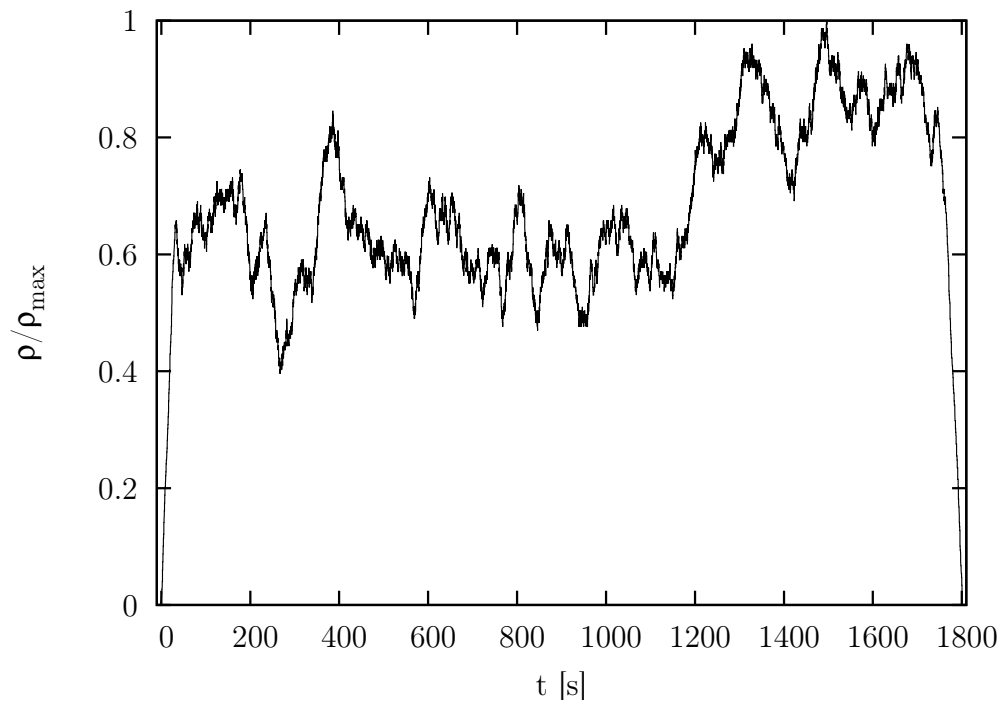


Abb. 4.6: *normierter Dichteverlauf; korrigierter Datensatz*

5 Die Modellierung und Simulation des korrigierten Datensatzes

5.1 Berechnung der Sicherheitsgeschwindigkeit

Wenn zwei Autos hintereinander fahren, kann es zu Auffahrunfällen kommen, wenn der Hintermann zu schnell fährt oder der Vordermann stark bremst. Im Straßenverkehr kommt es zu solchen Unfällen häufig, wenn man nur die absolute Zahl der Unfälle betrachtet. Wenn man jedoch bedenkt, wieviele Kilometer von einem Autofahrer unfallfrei gefahren werden, ist diese Zahl verschwindend gering. Im untersuchten Datensatz ist in den 30 Minuten kein Unfall zu verzeichnen. Dies ist ein Indiz dafür, dass ein gewisser Sicherheitsabstand in der Regel eingehalten wird. Es ist jedoch meist sinnvoller, von einer Sicherheitsgeschwindigkeit zu sprechen, die ein Autofahrer aufgrund seines Vordermanns fahren sollte, damit es zu keinem Unfall kommt

Diese Sicherheitsgeschwindigkeit v_{safe} lässt sich aus dem Abstand g und dem jeweiligen Bremsvermögen b berechnen. Hier sollte man nicht die maximale Verzögerungsfähigkeit annehmen, sondern eine Art komfortable Verzögerung, die man im normalen Verkehr bereit ist, auszunutzen. Zusätzlich zu den reinen Bremswegen d sollte eine Art zeitlicher Abstand T eingesetzt werden, dessen Größe von jedem Fahrer einzeln abhängt und dem Sicherheitsbedürfnis eines jeden Verkehrsteilnehmers entspricht. In der folgenden Herleitung steht i für den Hintermann und j für den Vordermann.

$$d(v_i) + v_i T_i \leq d(v_j) + g \quad (5.1)$$

$$d(v_{i/j}) = \frac{v_{i/j}^2}{2b_{i/j}} \quad (5.2)$$

$$\frac{v_i^2}{2b_i} + v_i T_i \leq \frac{v_j^2}{2b_j} + g \quad (5.3)$$

$$v_i = v_{\text{safe}} \quad (5.4)$$

$$0 = v_{\text{safe}}^2 + 2v_{\text{safe}}\tau_i b_i - 2gb_i - \frac{v_j^2 b_i}{b_j} \quad (5.5)$$

$$v_{\text{safe}_{1/2}} = -\tau_i b_i \pm \sqrt{\tau_i^2 b_i^2 + 2gb_i + v_j^2 \frac{b_i}{b_j}} \quad (5.6)$$

$$v_{\text{safe}} \geq 0 \quad (5.7)$$

$$v_{\text{safe}} = -\tau_i b_i + \sqrt{\tau_i^2 b_i^2 + 2g b_i + v_j^2 \frac{b_i}{b_j}} \quad (5.8)$$

5.2 Verkehrsmodelle

Verkehrsmodelle im allgemeinen beschreiben Car-Following-Prozesse. Das heißt, man versucht zu verstehen, wie der Hintermann auf den Vordermann reagiert. Hier gibt es beliebig viele Modelle, deren Ansätze so verschieden sind wie ihre Anwendungsgebiete. Zwei bzw. drei Modelle, die auf zwei grundsätzlich verschiedenen Ansätzen beruhen, sollen vorgestellt werden.

5.2.1 Das Bando-Modell

Das Bando-Modell ist auf den ersten Blick relativ einfach [1]. Es beruht auf der Annahme, dass sich die aktuelle Geschwindigkeit v in Richtung einer optimalen Geschwindigkeit v_{opt} relaxiert,

$$\Delta v = \frac{1}{\tau_{\text{Bando}}} (v_{\text{opt}} - v) \Delta t . \quad (5.9)$$

Wenn die optimale Geschwindigkeit höher als die aktuelle Geschwindigkeit ist, wird das Fahrzeug also beschleunigen und umgekehrt. Dabei ist die optimale Geschwindigkeit eine zu bestimmende Größe. Ein genutzter Ansatz ist eine vom Abstand Δx abhängige Optimalgeschwindigkeit.

$$v_{\text{opt}} = v_{\text{max}} \frac{(\Delta x)^2}{D^2 + (\Delta x)^2} = v_{\text{max}} \frac{1}{1 + \frac{D^2}{(\Delta x)^2}} \quad (5.10)$$

D ist dabei eine Konstante, die aus anderen Betrachtungen gewonnen werden muss. Sie stellt eine Art Wechselwirkungsabstand dar. Bei diesem Ansatz ist es unmöglich, die maximale Geschwindigkeit zu erreichen, da die optimale Geschwindigkeit erst bei unendlich langen Abständen gegen die Maximalgeschwindigkeit konvergiert. Dies ist im Straßenverkehr sicher unrealistisch, wenn man davon ausgeht, dass die Maximalgeschwindigkeit die Geschwindigkeit ist, die der Fahrer bereit ist zu fahren oder die von außen vorgegeben wird. Ein weiteres Problem ergibt sich bei großen Differenzen der Geschwindigkeiten. Dabei ergeben sich große Beschleunigungen, die in der Realität begrenzt sind.

Für die Simulation wurde deshalb das Modell abgeändert. Statt der optimalen Geschwindigkeit wurde die Sicherheitsgeschwindigkeit verwendet. Diese kann größer als die Maximalgeschwindigkeit des Einzelfahrzeugs sein, wodurch ein Erreichen dieser möglich wird. Die Simulation begrenzt in jedem Fall die Beschleunigungen, wodurch beiden Kritikpunkten Rechnung getragen wurde.

Der Relaxationskonstante τ wird als globaler Parameter betrachtet und zur Kalibrierung des Modells verwendet.

Insgesamt wird das Bando-Modell in der Simulation in der Form

$$\Delta v = \frac{1}{\tau_{\text{Bando}}} (v_{\text{safe}} - v) \Delta t \quad (5.11)$$

verwendet. Wenn man sehr kleine Δt betrachtet, findet man eine Differenzialgleichung für die Geschwindigkeit der Form

$$\frac{dv}{dt} = \frac{1}{\tau_{\text{Bando}}} (v_{\text{safe}} - v(t)) = a(t) . \quad (5.12)$$

Diese lässt sich lösen und liefert eine Exponentialfunktion für die Geschwindigkeit

$$v(t) = v_{\text{safe}} \left(1 - e^{-\frac{t}{\tau}}\right) + v_0 e^{-\frac{t}{\tau}} . \quad (5.13)$$

Dies liefert auch die Beschleunigung a in Abhängigkeit von der Zeit t

$$a(t) = \frac{1}{\tau} e^{-\frac{t}{\tau}} (v_{\text{safe}} - v_0) . \quad (5.14)$$

In Abbildung 5.1 ist die Sicherheitsgeschwindigkeit auf $v_{\text{safe}} = 31 \frac{\text{m}}{\text{s}}$ gesetzt. Das

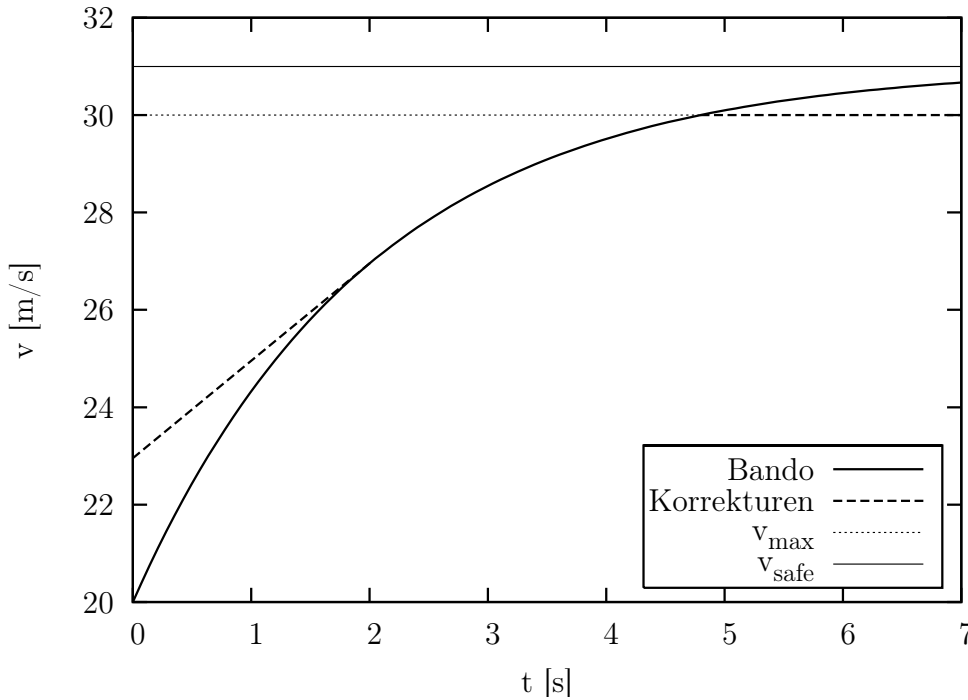


Abb. 5.1: Bando-Modell mit Korrekturen; $a_{\text{max}} = 2 \frac{\text{m}}{\text{s}^2}$; $v_{\text{safe}} = 31 \frac{\text{m}}{\text{s}}$; $v_{\text{max}} = 30 \frac{\text{m}}{\text{s}}$; $\tau = 2 \text{ s}$

Fahrzeug startet mit einer Geschwindigkeit von $v_0 = 20 \frac{\text{m}}{\text{s}}$ und hat eine Höchstgeschwindigkeit von $v_{\text{max}} = 30 \frac{\text{m}}{\text{s}}$. Die Geschwindigkeitsentwicklung im Bando-Modell

zeigt, dass das Fahrzeug anfangs eine höhere Beschleunigung hätte, als der Maximalwert von $2 \frac{m}{s^2}$. Die Maximalgeschwindigkeit wird später im unkorrigierten Bando-Modell überschritten, was natürlich an der hohen Sicherheitsgeschwindigkeit liegt. Durch die Korrekturen bleibt das Bando-Modell nur noch im mittleren Bereich gültig.

5.2.2 Ein künstliches Modell

Das Bando-Modell hat in seiner einfachen Form den Vorteil, dass es analytisch sehr gut handhabbar ist. In der Form, wie es in der Simulation verwendet wird, ist dies sicherlich nicht mehr gegeben. Allerdings bleibt es ein physikalisch motiviertes Modell.

Es sind jedoch auch Modelle denkbar, die zunächst keinen physikalischen Hintergrund haben. Diese Art von Modellen sollen im Folgenden künstliche Modelle genannt werden.

Ein sehr einfaches künstliches Modell soll nun vorgestellt werden.

$$\Delta v = a_{\max} \Delta t (1 - \zeta \epsilon) \quad (5.15)$$

Dabei ist ζ eine gleichverteilte Zufallszahl im Intervall $[0; 1]$ und ϵ eine Konstante, die für dieses Modell global festgelegt bzw. kalibriert werden muss.

Das Modell ist denkbar einfach. Es wird maximal beschleunigt und je nach Größe einer Zufallsvariablen wieder abgebremst. Wenn $\epsilon < 1$, dann wird in diesem Modell immer beschleunigt. Wenn es nötig ist zu bremsen, muss in diesem Fall die Simulation selbst durch Sicherheitsmechanismen dafür sorgen, dass es zu keinen Unfällen kommt. Ab einem Wert von $\epsilon = 2$ wird in diesem Modell mehr gebremst als beschleunigt. Dies führt dazu, dass eine Störung, die ein Auto zum Stillstand bringt, die gesamte Simulation zum Erliegen bringen kann. Dies ist in der Tat auch geschehen. Eine Abbruchbedingung der Simulation ist eine zu hohe Dichte auf der Straße. Die maximale Anzahl von sich momentan auf der Fahrbahn befindlichen Fahrzeugen im Datensatz ist 149 Fahrzeuge. Wenn in der Simulation mehr als 230 Fahrzeuge auf der Straße sind, wird die Simulation abgebrochen. In dieser Zahl sind 5 Fahrzeuge enthalten, die sich immer auf der Straße befinden (am Ende von Spur 1 bis 5). Die Abbruchbedingung ist also eine mehr als 50% höhere Dichte als die Maximaldichte im Datensatz.

5.2.3 Das erweiterte künstliche Modell

Eine Erweiterung des eben besprochenen künstlichen Modells ist es, eine Abfrage einzubauen, die entscheidet, ob die Sicherheitsgeschwindigkeit über- oder unterschritten ist und je nachdem beschleunigt oder gebremst, also gegebenenfalls statt a_{\max} b_{\max} verwendet wird. Dies hat eine interessante Konsequenz. Wenn man $\epsilon > 1$ setzt, kann es dazu kommen, dass ein Fahrzeug nicht nur bremst, wenn es beschleunigen könnte,

es wird auch teilweise beschleunigen, wenn es die Situation eigentlich verbietet. Dies könnte man in gewisser Weise menschliches Verhalten nennen. Menschen verhalten sich oft nicht richtig, was sich durch viele Unfälle im Straßenverkehr beweisen lässt.

5.3 Zufallszahlen

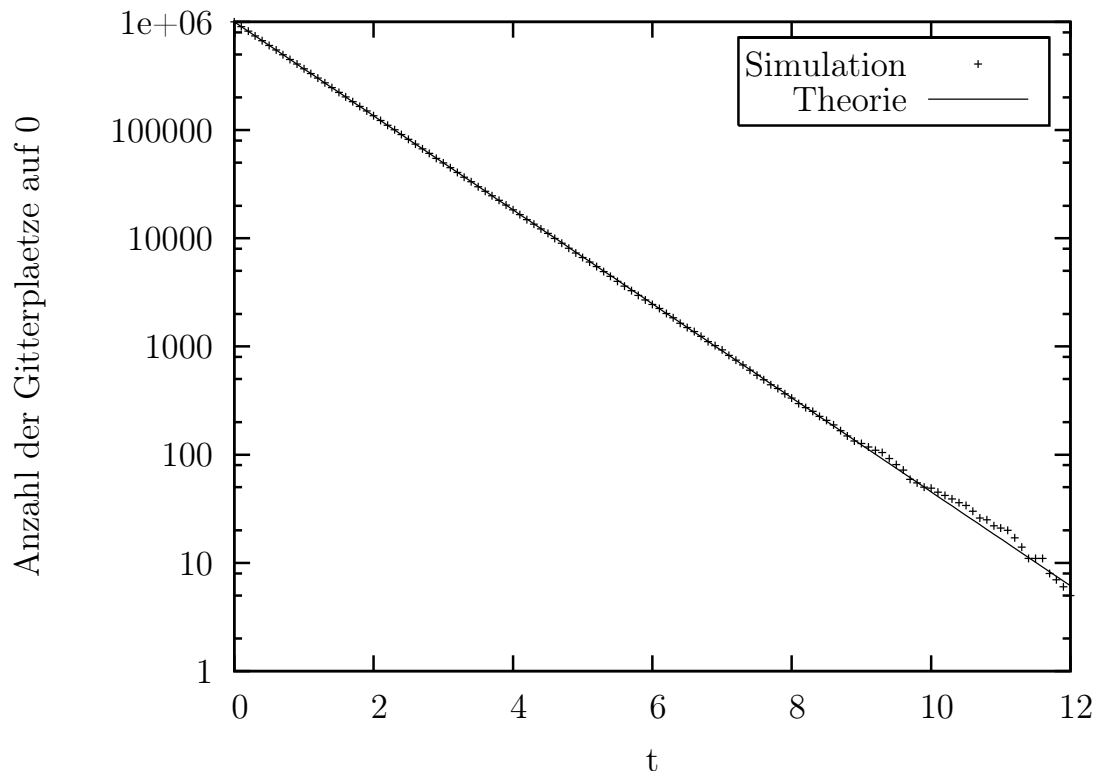


Abb. 5.2: Die Qualität der Zufallszahlen wurde anhand eines Fittes überprüft

Bei Monte-Carlo-Simulationen ist die Erzeugung von Zufallszahlen von zentraler Bedeutung. Leider können von Computern keine echten Zufallszahlen erzeugt werden. Man ist deshalb auf Algorithmen angewiesen, die sogenannte Pseudozufallszahlen erzeugen. Hierbei handelt es sich um deterministische Zahlenfolgen, die den Anschein der Zufälligkeit haben.

Der verwendete Zufallszahlengenerator soll hier nicht explizit beschrieben werden. Es ist jedoch wichtig, die erzeugten Zufallszahlen zu testen. Ein sehr einfacher Test wurde wie folgt durchgeführt [9].

Es wird ein Gitter der Größe L^3 erstellt. Jeder Gitterplatz erhält als Anfangswert den Wert 0. Anschließend wird $t \cdot L^3$ mal ein Gitterplatz zufällig ausgewählt und ihm der Wert 1 zugewiesen. Dabei sollte t eine Zahl der Größenordnung 10 sein. Theoretisch sollte die Zahl der noch auf 0 stehenden Gitterplätze proportional zu $\exp(-t)$

sein. Es wurde $L = 100$ gewählt. Das Ergebnis ist in Abbildung 5.2 dargestellt. Die theoretische Funktion hat die Form $f(t) = a \cdot \exp(-t)$, wobei der Fitparameter den Wert $a = 1.000.240 \pm 70$ hat. Das entspricht einem Fehler von 0,007%. Es kann also davon ausgegangen werden, dass die erzeugten Zufallszahlen eine hohe Qualität haben.

5.4 Spurwechselmodelle

Gegenstand aktueller Verkehrsforschung ist der Spurwechsel und wie man ihn simulieren kann [11]. Während man durch einen Vordermann als Fahrer recht eingeschränkt in seiner Entscheidung bezüglich der Geschwindigkeitswahl ist, sieht dies beim Spurwechsel anders aus. Wenn man auf einer mehrspurigen Straße fährt, ist es einem prinzipiell freigestellt, ob oder wann man auf eine andere Spur wechselt. Eine gewisse Vorgabe kann eine zu erreichende Abfahrt sein. Ein langsames vorherfahrendes Fahrzeug ist sicher auch ein guter Anlass, die Spur zu wechseln, um eine höhere Geschwindigkeit zu erreichen oder zu halten.

Wenn man sich entschlossen hat, die Spur zu wechseln, kommt die nächste Unbekannte ins Spiel. Welche Parameter bestimmen, ob man diesen Spurwechsel wirklich durchführt oder es aus eventuellem Risikobewusstsein bleiben lässt?

Der Spurwechsel hat sehr viele Freiheitsgrade, die ihn sehr schwer vorhersagbar bzw. simulierbar machen.

Der in der Simulation verwendete Algorithmus wird in Kapitel 5.6 detailliert beschrieben.

5.5 Charakteristische Fahrzeugwerte finden

Jedes Auto im Datensatz hat bestimmte Eigenschaften, die sich aus der jeweiligen Trajektorie des Fahrzeugs ermitteln lassen. Beispiele dafür sind Höchstgeschwindigkeit oder Bremsvermögen. Zu den Eigenschaften eines jeden Fahrzeugs zählen jedoch auch die Anfangswerte. Diese werden aus den jeweils ersten Daten eines Fahrzeugs übernommen. Das heißt, in einem Fahrzeug der Simulation sind alle 16 Informationen des ersten Zeitpunktes im Datensatz gespeichert.

In den folgenden Abschnitten soll erklärt werden, wie andere, spezifische Werte der Autos gefunden wurden und wie diese in der Simulation verwendet werden.

5.5.1 Maximalgeschwindigkeit

Als Ausgangspunkt dient die Geschwindigkeitstrajektorie des einzelnen Fahrzeugs. Aus dieser Trajektorie wird zunächst die real gefahrene Höchstgeschwindigkeit ermittelt. Diese muss jedoch nicht die theoretisch höchste Geschwindigkeit des Fahrzeugs sein. Wenn ein Fahrzeug sich durch dichten Verkehr bewegt, kann man davon ausgehen, dass es dort eine relativ geringe Höchstgeschwindigkeit erreicht hat. Wenn

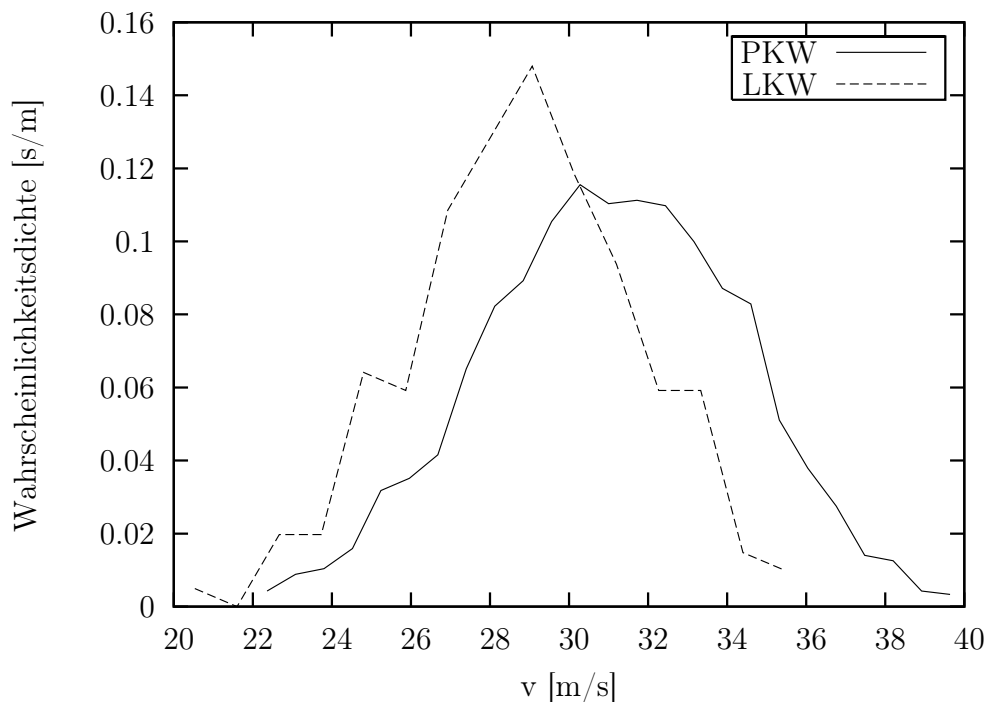


Abb. 5.3: Verteilung der maximalen Geschwindigkeiten nach Fahrzeug-Typ getrennt

man sich die Verteilungen der Höchstgeschwindigkeiten (siehe Abbildung 5.3) im freien Verkehr ansieht, kann man erkennen, dass sich LKWs mit einer maximalen Geschwindigkeit von etwa $30 \frac{\text{m}}{\text{s}}$ und PKWs mit $33 \frac{\text{m}}{\text{s}}$ fortbewegen. Es gibt zwar auch viele Fahrzeuge, die schneller fahren, der Mittelwert liegt allerdings bei oben genannten Werten.

Bei der Bestimmung der Höchstgeschwindigkeit wurde nun, wie gesagt, zunächst die reale Höchstgeschwindigkeit ermittelt. Wenn diese unter dem oben genannte Wert lag, wurde statt dessen dieser genommen ($30 \frac{\text{m}}{\text{s}}$ für LKWs und $33 \frac{\text{m}}{\text{s}}$ für PKWs). Das heißt, jedes Fahrzeug hat eine minimale Höchstgeschwindigkeit. Wenn das Fahrzeug schneller als diese war, wurde die höhere Geschwindigkeit gespeichert.

Dies hat zur Folge, dass die Simulation selbst die Höchstgeschwindigkeit herunter korrigieren muss. Würde man dies nicht tun und speicherte man die real gefahrenen Höchstgeschwindigkeiten, würde dies sicher in der Simulation bessere Ergebnisse liefern, allerdings würde man der Simulation auch einen großen Teil der Arbeit abnehmen. Um zu ermitteln, ob die Simulation gut arbeitet, ist dieses Vorgehen unerlässlich.

5.5.2 Maximalbeschleunigung

Unter der Maximalbeschleunigung versteht man das maximale Beschleunigungs- und Verzögerungsvermögen eines Fahrzeugs. Hierbei muss jedoch beachtet werden, dass

man im normalen Straßenverkehr die Fähigkeiten seines Fahrzeugs bei weitem nicht ausreizt. Das heißt, auch wenn ein mittelgroßer PKW mit 150 PS von 0 auf $100 \frac{\text{km}}{\text{h}}$ in 10 s beschleunigen kann, also ein Beschleunigungsvermögen von rund $2,8 \frac{\text{m}}{\text{s}^2}$ hat, wird der Fahrer dieses Beschleunigungsvermögen nicht auf der Landstraße einsetzen, um nach einem Tempo-80-Bereich wieder auf $100 \frac{\text{km}}{\text{h}}$ zu beschleunigen. Ähnlich verhält es sich beim Abbremsen. Ein modernes Auto kommt nach etwa 40 m zum Stehen, wenn es aus $100 \frac{\text{km}}{\text{h}}$ eine Vollbremsung einleitet. Das entspricht einem Verzögerungsvermögen von $9,6 \frac{\text{m}}{\text{s}^2}$, was fast Fallbeschleunigung ist. Dieses Potenzial wird ebenfalls im normalen Straßenverkehr nicht ausgeschöpft. Wenn man sich die

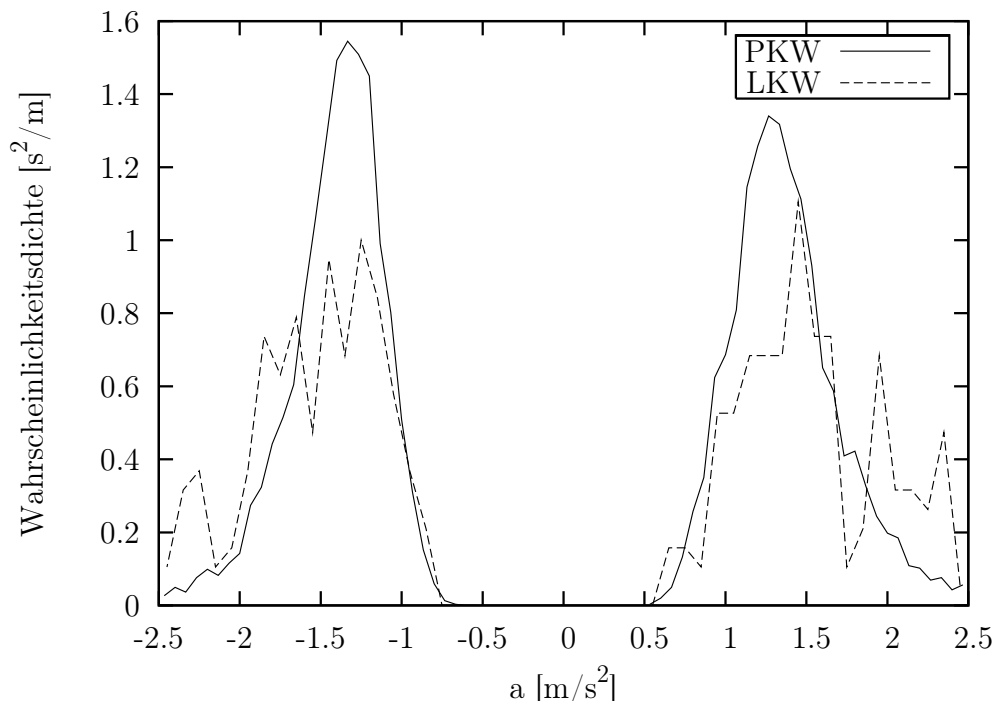


Abb. 5.4: Verteilung des Brems- bzw. Beschleunigungsvermögens nach Fahrzeug-Typ getrennt

Verteilungen der Maximalbeschleunigungen im korrigierten Datensatz (siehe Abbildung 5.4) ansieht, stellt man fest, dass sich der größte Teil der Werte zwischen 1 und $2 \frac{\text{m}}{\text{s}^2}$ befindet. Das ist sowohl bei Beschleunigung und Verzögerung als auch bei PKWs und LKWs der Fall. Eine Unterscheidung der Fahrzeugklasse ist also nicht nötig. Für die Grafik wurden die mittlere Beschleunigung und Verzögerung eines jeden Fahrzeugs ermittelt und die jeweilige Verteilung dieser Werte erstellt. Es stellt sich die Frage, welche sinnvollen Grenzen man bei diesen Werten ziehen sollte. Da es keine Maximalwerte im eigentlichen Sinn gibt, ist es unter anderem eine Charakterfrage des Fahrers, wie stark er beschleunigt und bremst. Eine sinnvolle untere Grenze stellt wohl $1 \frac{\text{m}}{\text{s}^2}$ dar. Beim Maximalwert muss man aufpassen, da eine sehr hohe Beschleunigung durchaus das Ergebnis eines Messfehlers der Positionsdaten

sein kann. Im Originaldatensatz hat man gesehen, dass die Beschleunigungen bei $\pm 3,048 \frac{\text{m}}{\text{s}^2}$ abgeschnitten wurden. Die aus den geglätteten Werten ermittelten Beschleunigungen wurden nicht beschnitten, zeigen aber teilweise starke Ausschläge über $\pm 3,048 \frac{\text{m}}{\text{s}^2}$ hinaus. Eine maximale Maximalbeschleunigung von $2 \frac{\text{m}}{\text{s}^2}$ ist sicher sinnvoll.

Es wurde also die jeweilige Maximalbeschleunigung ermittelt. Diese wurde nach unten auf $1 \frac{\text{m}}{\text{s}^2}$ und nach oben auf $2 \frac{\text{m}}{\text{s}^2}$ beschnitten. Dies gilt für Beschleunigung, Verzögerung, PKWs und LKWs.

5.5.3 Zeitabstand für Sicherheitgeschwindigkeit

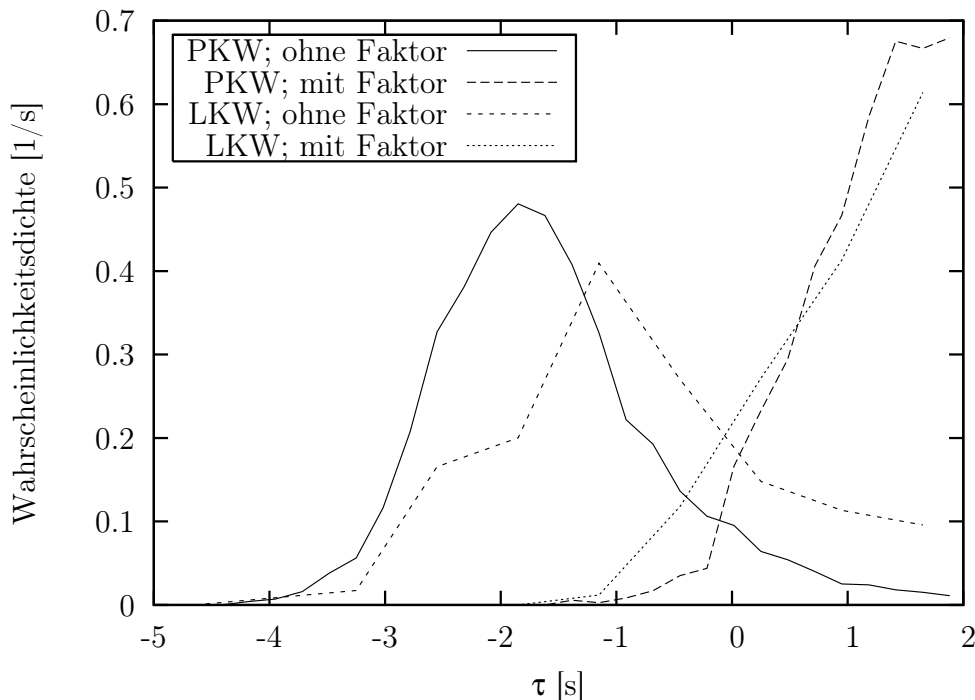


Abb. 5.5: Verteilung der ermittelten zeitlichen Sicherheitsabstände nach Gleichung 5.18 (ohne Faktor) und 5.19 (mit Faktor) nach Fahrzeug-Typ getrennt

Wie bereits erwähnt, kann man die Sicherheitgeschwindigkeit über die Bremswege, den Abstand und eine Zeitkonstante τ , die einen zusätzlichen minimalen zeitlichen Abstand darstellt, berechnen. Die Zeitkonstante muss vorher ermittelt werden und ist für jeden Fahrer einzigartig (siehe Gleichung 5.8).

Die Idee, wie man diese Konstante ermittelt, ist die, aus den Daten zweier hintereinander fahrender Fahrzeuge diesen minimalen Zeitabstand zu ermitteln. Hierfür werden Fahrzeugpaare betrachtet, die einen Abstand zwischen 0 und 50 m und eine Differenzgeschwindigkeit zwischen -5 und $5 \frac{\text{m}}{\text{s}}$ haben. Zusätzlich sollte das hinterher fahrende Fahrzeug schneller als $5 \frac{\text{m}}{\text{s}}$ fahren. Wenn man einen größeren Abstand

mit einbezieht, ist die Korrelation dieser Fahrzeuge nicht mehr gewährleistet. Bei Geschwindigkeitsdifferenzen außerhalb des betrachteten Intervalls liegen eventuell Fehler vor oder es besteht keine Korrelation. Die Mindestgeschwindigkeit von $5 \frac{\text{m}}{\text{s}}$ lässt sich dadurch erklären, dass es im Stau andere Mechanismen gibt, die die Geschwindigkeit regeln. Bei geringen Geschwindigkeiten kann man davon ausgehen, dass es sich zumindest um stauähnliche Situationen handelt.

Die Formel für die Sicherheitsgeschwindigkeit (5.8) lässt sich nach τ umstellen.

$$\tau_i = \frac{g}{v_{\text{safe}}} + \frac{1}{2 \cdot v_{\text{safe}}} \left(\frac{v_j^2}{b_j} - \frac{v_{\text{safe}}^2}{b_i} \right) \quad (5.16)$$

Wenn man für die Sicherheitsgeschwindigkeit die aktuelle Geschwindigkeit verwendet, erhält man eine Reihe von Werten, die das jeweilige aktuelle τ darstellen.

$$\tau_i = \frac{g}{v_i} + \frac{1}{2 \cdot v_i} \left(\frac{v_j^2}{b_j} - \frac{v_i^2}{b_i} \right) \quad (5.17)$$

Das Minimum dieser Werte kann als das für den Fahrer charakteristische τ festgelegt werden.

In der Formel für die Sicherheitsgeschwindigkeit kommen auch die maximalen Verzögerungswerte vor. Als erste Näherung kann man die vorher ermittelten Werte für das jeweilige Bremsvermögen der Fahrzeuge einsetzen. Man sieht jedoch an der Verteilung (siehe Abbildung 5.5) der ermittelten Werte für τ , dass es sehr oft vorkommt, dass ein Fahrzeug schneller als die Sicherheitsgeschwindigkeit fährt. Dies ist ersichtlich an den negativen Werten für τ .

Es stellt sich die Frage, wie man mit diesem Sachverhalt umgehen kann. Ein erster Versuch könnte sein, für das Bremsvermögen der Vordermannes das eigene Bremsvermögen anzusetzen.

$$\tau_i = \frac{g}{v_i} + \frac{1}{2 \cdot v_i} \left(\frac{v_j^2}{b_i} - \frac{v_i^2}{b_i} \right) \quad (5.18)$$

Dies macht Sinn, da man eigentlich nur über das eigene Fahrzeug bescheid weiß und dieses Wissen auf andere Fahrzeuge projiziert. Dies ändert die Sachlage jedoch nur sehr wenig.

Eine weitere Möglichkeit ist, die Werte für das Bremsvermögen mit einem Faktor F_b zu multiplizieren. Dieser Faktor gibt in gewisser Weise an, wie stark sich die im Straßenverkehr verwendete von der maximalen Bremskraft unterscheidet. Hierbei sei jedoch erwähnt, dass hier auch nicht die maximale Bremskraft gemeint ist, sondern die in den Augen des Fahrers maximale Bremskraft, da er nach dieser seinen Abstand bzw. seine Geschwindigkeit reguliert. Hier gibt es nun mehrere Möglichkeiten, diesen Faktor einzuführen.

Es ist sicher sinnvoll, wieder das Bremsvermögen des Vordermannes durch das des gerade untersuchten Fahrzeugs zu ersetzen. Man sollte jedoch nur das eigene

Bremsvermögen mit dem besagten Faktor versehen, da man sonst von einer möglichen Vollbremsung des Vordermannes ausgeht.

$$\tau_i = \frac{g}{v_i} + \frac{1}{2 \cdot v_i} \left(\frac{v_j^2}{b_i} - \frac{v_i^2}{F_b \cdot b_i} \right) \quad (5.19)$$

Dies ist sicher im normalen Straßenverkehr unrealistisch, obwohl es nicht unmöglich ist.

Es bleibt die Frage, wie man diesen Faktor genau bestimmt. Ein sinnvoller Wert für den Faktor ist dann gefunden, wenn ein sehr geringer Teil der Verteilung für τ im negativen Bereich ist. Hier einen sinnvoll anzusetzenden Vertrauensbereich zu finden, ist schwierig. Es wurde sich für 97,5% entschieden. Das heißt, von den 4733 Werten für τ liegen 115 Fahrzeuge im negativen Bereich. Diese Zahl ergibt sich genauer gesagt aus einem Vertrauensbereich von 97,57%. Bei diesem Vertrauensbereich hat der gesuchte Faktor einen Wert von 1,6. Negative Werte für τ werden auf 0 gesetzt. Nach oben wird eine Grenze von 2 s festgelegt.

Um τ entgültig zu ermitteln, wurde folgendes getan. Zunächst wurden für jedes Fahrzeug zwei τ -Werte bestimmt. Ein Wert ergibt sich aus der Gleichung 5.18, wenn man also für die Bremskraft des Vordermannes seine eigene Bremskraft annimmt und diese nicht mit besagtem Faktor multipliziert. Beim zweiten Wert wurde die eigene Bremskraft mit dem Faktor multipliziert, die des Vordermannes ist die eigene (Gleichung 5.19). Wenn für den ersten Wert ein positiver Wert heraus kommt, wird dieser genommen und der Fahrer als nicht aggressiv eingestuft. Wenn der Wert negativ ist, wird der Fahrer als aggressiv eingestuft, der zweite Wert wird als Wert für τ gespeichert.

Als Endergebnis hat man also ein individuelles Bremsvermögen, einen individuellen Zeitabstand zum Vordermann und einen Faktor, der angibt, wie stark das eigene Bremsvermögen im Vergleich zum im normalen Straßenverkehr gebräuchliche Bremsvermögen eingeschätzt wird. Dieser ist bei aggressiven Fahrern 1,6, beim Rest der Fahrer ist dieser Faktor 1.0. Hierbei muss man sich Gedanken machen, wie dieser Faktor in der Praxis eingesetzt wird. Die Sicherheitsgeschwindigkeit wird inklusive dieses Faktors berechnet. Die Bremskraft inklusive dieses Faktors wird jedoch nur eingesetzt, wenn es wirklich nötig ist.

Im Endeffekt ergibt sich dadurch eine starke Inhomogenität, die gewünscht ist und gerade den Unterschied zu herkömmlichen Simulationen mit identischen Fahrzeugen ausmacht.

5.5.4 Zielwerte

Für die Simulation sind nicht nur Anfangswerte wichtig. Es kann auch wichtig werden, zu wissen, in welchem Zustand das Fahrzeug war, als es den Datensatz verließ. Diese Werte können beispielsweise dafür benutzt werden, gewisse Randwerte zu realisieren, die die Simulation quasi rückwärts beeinflussen. Wenn man weiß, welche

Geschwindigkeiten am Ende einer Spur gefahren wurden und dies in der Simulation implementiert, wird dies Auswirkungen auf die Fahrzeuge auf der Spur haben.

Dieses Vorgehen hat zur Folge, dass man Gegebenheiten in die Simulation einbezieht, die außerhalb des untersuchten Abschnittes liegen. Es ist beispielsweise bekannt, dass sich Staus rückwärts durch den Verkehr bewegen. Wenn sich also solch ein Stau ausbildet, wird dieser in die Messdaten vom Ende an in den Datensatz einfließen. Einen Grund für den Stau wird man jedoch nicht finden, da dieser weiter vorne in Fahrtrichtung liegt. Es ist also durchaus legitim, diese Werte von außen vorzugeben.

Registrierte Endwerte sind die Zielgeschwindigkeit, die Zielspur und die Position in Fahrtrichtung.

5.5.5 Andere Modell-Parameter

Die Arbeit mit Modellen erfordert ein vorheriges Festlegen der Parameter.

In der Simulation wird unter anderem ein sehr einfaches Modell getestet, in dem die Konstante ϵ vorkommt. Diese Konstante gibt an, um wieviel sich die aktuelle Beschleunigung von der maximalen Beschleunigung unterscheidet. Diesen Parameter könnte man für jedes Fahrzeug einzeln bestimmen. Hier wird er jedoch als globale Konstante angenommen. Diese Konstante bekommt jedes Fahrzeug zusätzlich mit auf den Weg, um später eventuell auch eine individuelle Lösung zu finden.

Wie bereits erwähnt, wurde das Bando-Modell abgeändert. In diesem Modell kommt der Parameter τ_{Bando} vor. Dieser Parameter wird auf gleiche Weise bestimmt, wie ϵ . Das heißt, er wird global festgelegt mit der Option auf eine individuelle Erweiterung. Der Grund, warum das auch bei diesem Parameter so getan wurde, ist der, dass es nicht möglich war, vernünftige Werte aus den Trajektorien zu finden.

5.5.6 Werte zum Spurwechsel

Ein wichtiger Teil der Simulation ist der Spurwechsel. Über die getätigten Spurwechsel sollten Informationen in der Simulation verfügbar sein. Hierfür werden zunächst die Richtungen aller getätigten Spurwechsel gespeichert. Falls keine Spurwechsel von einem Fahrzeug getätigt wurden, wird dies extra gespeichert. In der Simulation kann man dann solchen Fahrzeugen einen Spurwechsel verbieten.

Zusätzlich wird der Zeitpunkt des ersten Spurwechsels gespeichert. Dies ist deshalb wichtig, da gerade am Anfang einer Simulation keine Informationen über die Fahrzeuge hinter dem jeweiligen Fahrzeug verfügbar sind. Ein Fahrzeug könnte in der Simulation einen Spurwechsel machen, der in der Realität gar nicht möglich wäre. Die Information, wann der erste Spurwechsel getätigt wurde, kann verwendet werden, diese unsinnigen Spurwechsel zu verhindern. Es wurde der Zeitpunkt des ersten Spurwechsels gespeichert, falls dieser unter 2 s liegt. Andernfalls wurde 2 s gespeichert.

Wenn ein Fahrzeug einen Spurwechsel getätigt hat, ist es nicht sinnvoll, den nächsten Spurwechsel sofort im nächsten Moment zu erlauben. Um einen Algorithmus zu entwickeln, der die Mindestzeit bis zum nächsten Spurwechsel bestimmt, wird die jeweilige Zeit zwischen zwei Spurwechseln registriert. Die Verteilung dieser zeitli-

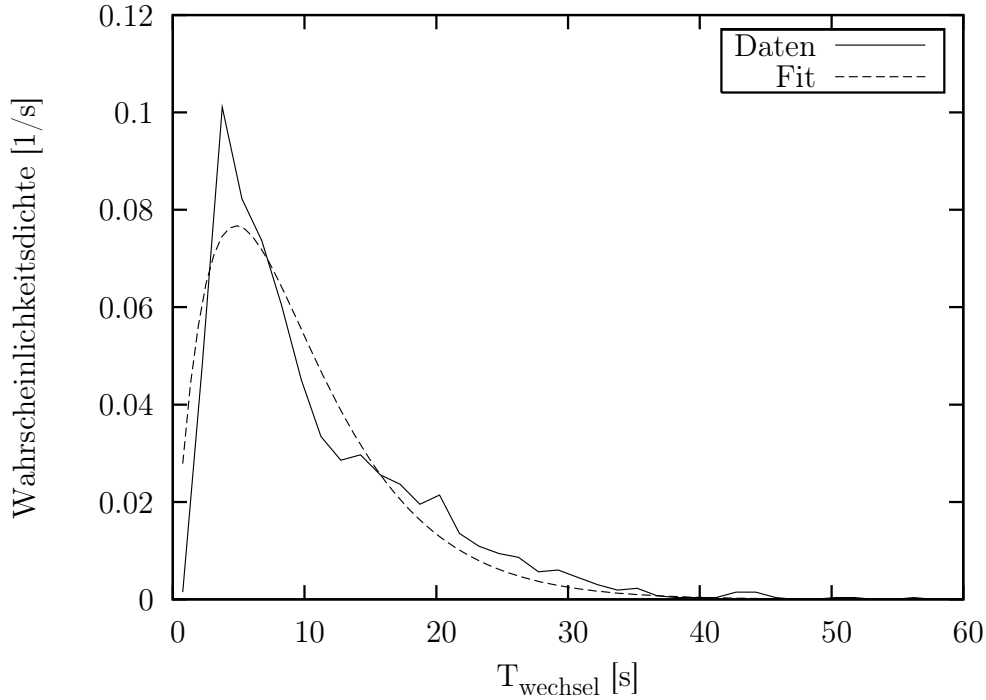


Abb. 5.6: Verteilung der ermittelten Zeitabstände zwischen zwei Spurwechseln eines Fahrzeugs, Fit mit Erlang-Funktion 5.21

chen Abstände ist in Abbildung 5.6 gegeben. Die Verteilung wurde mit der Erlang-Verteilung gefittet.

$$f(x) = \frac{\lambda^{n+1}}{n!} x^n e^{-\lambda \cdot x} \quad (5.20)$$

Die gefittete Funktion liefert für $\lambda = 0,209 \pm 0,009$ und $n = 1$

$$f(x) = 0.043681 \cdot x \cdot e^{-0,209 \cdot x} . \quad (5.21)$$

5.5.7 Die Startwerte eines Fahrzeugs

Wenn ein Fahrzeug in die Simulation eintritt, muss es gewisse Startwerte haben. Ein stehendes Auto auf die Straße zu stellen, ist beispielsweise sicher unsinnig. Als ersten Ansatz ließen sich hier die ersten Werte des jeweiligen Fahrzeugs aus dem Datensatz verwenden. Bei kleinen Störungen in der Simulation kann das aber zu

Staus führen, da eventuell drei oder mehr Fahrzeuge mit überhöhter Geschwindigkeit in den Datensatz hineinfahren, wenn nur ein Fahrzeug etwas langsamer fährt.

Das Problem wurde gelöst, indem jedes Fahrzeug zu Anfang der Simulation die Geschwindigkeit des Vordermannes hat. Das kann man so begründen, dass auch im realen Straßenverkehr meist die Geschwindigkeit des Vordermannes gefahren wird. Der Abstand zum Vordermann ist dabei mindestens der aus der Sicherheitsgeschwindigkeit (siehe Gleichung 5.19) ermittelte Abstand g .

$$g = v_j \cdot \tau_i + \frac{v_j^2}{2 \cdot b_i} \left(\frac{1}{F_b} - 1 \right) \quad (5.22)$$

Das heißt, das Fahrzeug wird entweder bei der Stelle auf die Straße gesetzt, wo es auch im Datensatz dies tat oder es wird weiter nach hinten gesetzt, falls dies der Sicherheitsabstand nötig macht. Weiter nach vorne wird ein Fahrzeug nicht gestellt. Außerdem wird auch die Höchstgeschwindigkeit des Fahrzeugs nicht überschritten, obwohl der Sicherheitsabstand damit berechnet wird.

Wenn ein Fahrzeug keinen Vordermann hat, was auf der Zufahrt durchaus der Fall sein kann, werden die Originalwerte verwendet.

5.5.8 Die Endwerte eines Fahrzeugs

Eine weitere Besonderheit sei an dieser Stelle erwähnt, auf die man bei dieser Simulation achten muss. Obwohl ein Fahrzeug nach etwa 900 m den Datensatz verlässt, verlässt es jedoch nicht die Straße selbst. Der Hintermann sieht ihn in der Realität natürlich weiterhin, was im Datensatz jedoch nicht erfasst ist. Wenn man dies nicht beachten würde, hätte das zur Folge, dass das jeweils vorderste Auto in der Simulation keinen Vordermann sieht und stark beschleunigt. Dies hätte eine Kettenreaktion zur Folge, die die komplette Simulation verfälschen würde.

In der Simulation wird als Zielgeschwindigkeit die Geschwindigkeit gewählt, die ein Fahrzeug hatte, das zu diesem Zeitpunkt auf dieser Spur den Datensatz verlassen hat. Wenn kein Auto für genau diesen Zeitpunkt gefunden wurde, wird der nächst mögliche Zeitpunkt genommen. Wenn die Simulation länger dauert als der Datensatz Daten enthält, wird der letzte verfügbare Geschwindigkeitswert dieser Spur genommen. Damit muss ein Fahrzeug nicht die Werte als Zielwerte bekommen, die es auch in der Realität hatte. Insbesondere kommt dies vor, wenn ein Fahrzeug auf einer anderen Spur ankommt. Aber auch, wenn ein Fahrzeug schneller oder langsamer simuliert wurde, ist ein anderer Wert zu erwarten.

5.6 Der Spurwechsel

In der Simulation wird überprüft, ob ein Fahrzeug einen Spurwechsel machen darf bzw. kann. Es werden nacheinander verschiedene Werte abgefragt und entschieden, ob aufgrund eines Wertes, beispielsweise der Position des linken Hintermannes, ein

Spurwechsel verboten ist. Wenn nichts gegen einen Spurwechsel spricht, wird dieser dann getätigt.

Zunächst wird überprüft, ob ein Wechselverbot für Fahrzeuge besteht, die im realen Datensatz keinen Spurwechsel getätigt haben. Wenn ein solches Verbot besteht, wird hier der Spurwechsel gegebenenfalls verhindert.

Jedes Fahrzeug hat für eine gewisse Zeit ein Wechselverbot, falls es vor kurzer Zeit schon einmal die Spur gewechselt hat. Sollte diese Zeit noch nicht überschritten sein, wird kein Spurwechsel getätigt.

Wenn ein Fahrzeug sich auf Spur 8 befindet, wird kein Spurwechsel erlaubt, da dies auch nicht in der Realität vorkam, dass ein Fahrzeug von der Abfahrtsspur wieder zurück auf Spur 6 wechselte.

Wenn sich ein Fahrzeug auf der Auffahrtsspur befindet, will es mit Sicherheit nach links die Spur wechseln. Dies kann es tun, wenn es sich im Wechselbereich befindet und nach hinten und vorn genug Platz ist. Genauer wird überprüft, ob die Relation

$$\Delta v \cdot T_W - g \geq 0 \quad (5.23)$$

nach hinten und vorne erfüllt ist. Dabei ist Δv der Geschwindigkeitsunterschied der beiden Fahrzeuge, g der positive Abstand und T_W eine Zeitkonstante, die angibt, wie lange ein Fahrzeug brauchen darf, um bei gleichbleibenden Geschwindigkeiten den Abstand aufzuholen. In der Simulation wurde $T_W = 3$ s gesetzt. Zusätzlich wird überprüft, ob der Abstand selbst größer 0 ist. Die Geschwindigkeitsdifferenz Δv ist immer positiv, wenn der Abstand bei gleicher Fahrweise geringer wird.

Bei den restlichen Spuren wird überprüft, ob ein Spurwechsel überhaupt sinnvoll ist. Ein Spurwechsel ist dann sinnvoll, wenn die eigene Geschwindigkeit geringer ist als 95% der eigenen Maximalgeschwindigkeit. Die restlichen Überprüfungen sind die oben genannten Sicherheitsbedingungen, sowie ein eventuelles Wechselverbot durch ein Zeitlimit oder allgemein von außen vorgegeben. Sollten Spurwechsel nach links und rechts möglich sein, wird die Spur mit der höchsten möglichen Geschwindigkeit gewählt, unabhängig von der eigenen Höchstgeschwindigkeit.

Wenn ein Spurwechsel möglich und erwünscht ist, wird dieser durchgeführt. Anschließend wird eine Zufallszahl bestimmt, die angibt, wie lange ein Fahrzeug keinen Spurwechsel mehr machen darf.

5.7 Die Aktualisierung

Das Herzstück der Simulation ist neben dem Spurwechsel die Aktualisierung der Geschwindigkeit und damit auch der Position des jeweiligen Fahrzeugs. Hierfür wird davon ausgegangen, dass der Fahrer seine eigene Fahrweise aufgrund der Fahrweise des Vordermannes anpasst.

Zunächst wird überprüft, ob ein Fahrzeug bereits am Ende der Straße angekommen ist. Falls dies der Fall ist, wird die aktuelle Geschwindigkeit einfach beibehalten.

Es wurde bereits erwähnt, dass die Autos länger in der Simulation verweilen als im Datensatz selbst.

Ansonsten wird die Aktualisierung der Geschwindigkeit aufgrund der des Vordermannes vorgenommen. Der jeweilige Algorithmus wird anfangs festgelegt. Dabei ergibt sich ein Problem auf den Spuren 6 und 7, falls kein Vordermann vorhanden ist. Das Fahrzeug würde maximal beschleunigen, egal wie lang die Spur noch ist. In der Simulation wurde das Problem so gelöst, dass ans Ende der Spur ein virtuelles Fahrzeug gestellt wird. Dieses Fahrzeug steht still. Wenn ein Fahrzeug auf dieses Fahrzeug auffährt, muss es bremsen und hält notfalls an, bis es einen Spurwechsel machen kann.

Die Aktualisierung der Geschwindigkeit ist noch keinem Kontrollmechanismus unterworfen, ob maximale Beschleunigung oder Verzögerung eingehalten wurden. Dies wird anschließend getan. Der Grund, warum zunächst die Geschwindigkeit aktualisiert wird und dann erst Kontrollmechanismen eingreifen, hat programmiertechnische Gründe. Egel, welchen Algorithmus man verwendet, man muss diese Kontrollen durchführen, womit sie auch ausgelagert werden können. Der jeweilige Algorithmus wird kleiner und weniger aufwendig zu implementieren und zu pflegen. Zunächst wird überprüft ob die Maximalbeschleunigung überschritten wurde.

$$\frac{\Delta v}{\Delta t} \leq a_{max} \quad (5.24)$$

Falls dies der Fall ist, wird die Maximalbeschleunigung angestzt und die Geschwindigkeit damit aktualisiert. Das gleiche wird mit der maximalen Verzögerung getan. Dabei wird zunächst nicht der Agressionsparameter mit in die Berechnung einbezogen. Im normalen Verkehr sollte dieser nicht zum Tragen kommen. Dann wird die Sicherheitsgeschwindigkeit berechnet und überprüft, ob die aktuelle Geschwindigkeit eventuell über dieser liegt. Die Sicherheitsgeschwindigkeit wird ohne den bevorzugten zusätzlichen Zeitabstand berechnet, um möglichst wenig Eingriffe in die Simulation von außen zu haben. Wird die so berechnete Sicherheitsgeschwindigkeit überschritten, kommt der Agressionsfaktor zum Tragen und das Bremsvermögen um diesen Faktor erhöht und damit gebremst. In diesem Fall wurde also eine Art Notbremsung eingeleitet. Letztendlich wird noch überprüft, ob die Maximalgeschwindigkeit überschritten wurde. In einigen Modellen können auch negative Geschwindigkeiten auftreten. Diese beiden Aspekte werden überprüft und gegebenenfalls korrigiert. Insgesamt liegt also die Beschleunigung im Normalfall zwischen maximaler Beschleunigung und maximaler Verzögerung. Wenn es nötig ist, wird mit der maximalen Verzögerung inklusive Agressionsparameter gebremst.

Wenn die neue Geschwindigkeit bestimmt ist, kann die neue Position berechnet werden. Wenn ein Fahrzeug anschließend das Ende der Fahrbahn erreicht hat, wird die Geschwindigkeit wie beschrieben eingestellt und im weiteren dabei belassen.

5.8 Ablauf der Simulation

Die Simulation besteht aus drei Abschnitten.

Im ersten Abschnitt fahren die Fahrzeuge entsprechend ihrer Trajektorie im Datensatz die Straße entlang. Dies wird solange getan, bis auf jeder möglichen Spur mindestens ein Fahrzeug die komplette Distanz passiert hat. Dann hat jedes Fahrzeug einen Vordermann und der zweite Abschnitt kann beginnen.

Im zweiten Abschnitt wird der Verkehr simuliert. Entsprechend dem verwendeten Algorithmus werden die Geschwindigkeiten und anschließend die Positionen aktualisiert. Vor dieser Aktualisierung wird überprüft, ob ein Spurwechsel gemacht werden soll und dieser dann gegebenenfalls auch getätigt. Auf die Algorithmen wurde bereits eingegangen.

Im dritten Teil kommen keine Fahrzeuge mehr hinzu, da alle Fahrzeuge bereits auf der Spur sind, bzw. diese schon wieder verlassen haben. Die Simulation ist beendet, wenn alle Fahrzeuge die Straße verlassen haben.

Wenn man ein Vielteilchensystem betrachtet, muss man darauf achten, dass gleichzeitige Prozesse auch gleichzeitig simuliert werden und sequenzielle Prozesse auch sequenziell abgearbeitet werden. Ein einfaches Beispiel wäre eine Aktualisierung zweier Autos, die hintereinander fahren. Das erste Auto wird aktualisiert und hat eine neue Geschwindigkeit und eine neue Position. Das dahinter fahrende Fahrzeug soll anschließend aktualisiert werden. In der Simulation wird es später simuliert, der simulierte Zeitschritt ist jedoch immernoch der selbe. Das Fahrzeug muss also als Referenzwerte die alten Werte des Fahrzeugs vor ihm bekommen. Dafür wird in der Simulation gesorgt, indem sich jedes Fahrzeug die jeweils letzten Positions- und Geschwindigkeitsdaten merkt.

Eine Ausnahme von dieser Regel ist der Spurwechsel. Hierbei wird sich nicht die alte Spur gemerkt. Das hat zur Folge, dass sich ein Vordermann innerhalb eines Zeitpunktes ändern kann. Wenn man dies nicht tut, hätte das eventuell zur Folge, dass zwei Fahrzeuge einen Spurwechsel auf die gleiche Stelle tätigen, was zu einem Unfall führen würde.

Die Simulation selbst gibt dann einen simulierten Datensatz aus, der den gleichen Aufbau hat, wie der korrigierte Original-Datensatz. Diese beiden Datensätze können dann anschließend verglichen werden.

6 Analyse und Vergleich der Simulationsdaten

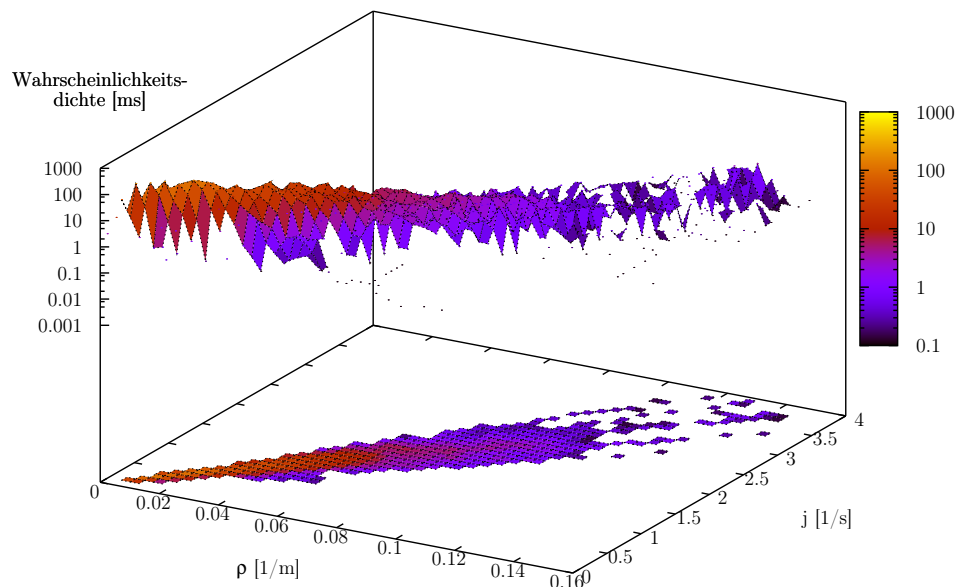


Abb. 6.1: Fundamentaldiagramm; komplette Zeit; Simulation mit Parametersatz 37

Das Ergebnis einer jeden Simulation ist ein Datensatz, der vom Aufbau her dem Originaldatensatz gleicht. Die Auswertalgorithmen können somit auch auf die Simulationsdaten angewendet werden. Ein rein optischer Vergleich der entstehenden Graphen kann also schon Anhaltspunkte geben, ob eine Simulation die Realdaten gut oder schlecht reproduziert.

Eine rein optische Analyse ist jedoch zum einen wenig aussagekräftig und zum anderen aufwendig, wenn man viele Simulationen laufen lässt. Wünschenswert wäre eine einzelne Zahl, die die Qualität der Simulation charakterisiert.

6.1 Fundamentaldiagramme

Ein mikroskopisches Fundamentaldiagramm in der Art, wie es bereits beschrieben wurde, stellt eine Fläche dar, die ein normiertes Volumen (Gesamtvolume gleich 1) einschließt. Dabei ist das Volumen immer kleiner gleich 1, da nur bestimmte Intervalle dargestellt werden.

Nach der Simulation hat man zwei Fundamentaldiagramme, die bei einer perfekten Simulation deckungsgleich sind. Aus den beiden Graphen lässt sich ein Differenzgraph erstellen. Dabei wird für jede Stelle der Differenzbetrag der beiden Datenpunkte ermittelt und somit ein dritter Graf erstellt. Dieser Graf ist bei einer perfekten Simulation überall identisch 0. In allen anderen Fällen ist er überall positiv. Das eingeschlossene Volumen kann nicht größer als 2 werden. Das wäre der Fall, wenn der Graph der Simulation nur da Werte hat, wo der Graph der Originaldaten keine Werte hat. Im Allgemeinen liegt das Volumen also zwischen 0 und 2.

Hier muss noch entschieden werden, was mit Werten außerhalb des dargestellten Bereiches geschehen soll. Diese Werte bewirken, dass das umschlossene Volumen im betrachteten Intervall kleiner als 1 ist. Das Volumen des Differenzgraphen würde stark verfälscht werden.

Bei der Auswertung wurde zunächst das Volumen des Differenzgraphen berechnet. Anschließend wurden zu diesem Wert die Volumina addiert, die außerhalb des betrachteten Intervalls liegen, also das Volumen, was bis zu 1 fehlt. Das hat zur Folge, dass das Volumen des Differenzgraphen nie 0 werden kann, da ja schon das Volumen des Originalgraphen nicht 1 ist, zum anderen kommt es zu keiner Verfälschung. Eine Verfälschung würde beispielsweise auftreten, wenn eine Simulation nur Werte liefern würde, die weit abseits der Originalwerte liegen. Der Graf wäre im betrachteten Intervall gleich 0, das Differenzvolumen wäre das Volumen des Originalgraphen und somit etwa 1. Eine andere Simulation, die Werte im betrachteten Intervall liefert, also besser als die zuvor betrachtete Simulation ist, würde unter Umständen einen Wert für das Differenzvolumen liefern, der oberhalb der zuvor erhaltenen 1 liegt. Eine ungerechtfertigt bessere Beurteilung der ersten Simulation wäre das Ergebnis. Diese Fehleinschätzung tritt bei Addition der Volumina im Außenbereich nicht auf.

Somit ergibt sich für die Berechnung des Differenzvolumens V_{diff} die Formel

$$V_{\text{diff}} = V_{\text{diff,in}} + 2 - V_{\text{sim,in}} - V_{\text{orig,in}} , \quad (6.1)$$

wobei $V_{\text{diff,in}}$, $V_{\text{sim,in}}$ und $V_{\text{orig,in}}$ jeweils die Volumen innerhalb des betrachteten Intervalls sind.

Die Abbildungen 6.1 bis 6.4 zeigen die zu den Abbildungen 4.2 bis 4.5 analogen Fundamentaldiagramme der Simulation mit dem Parametersatz 37.

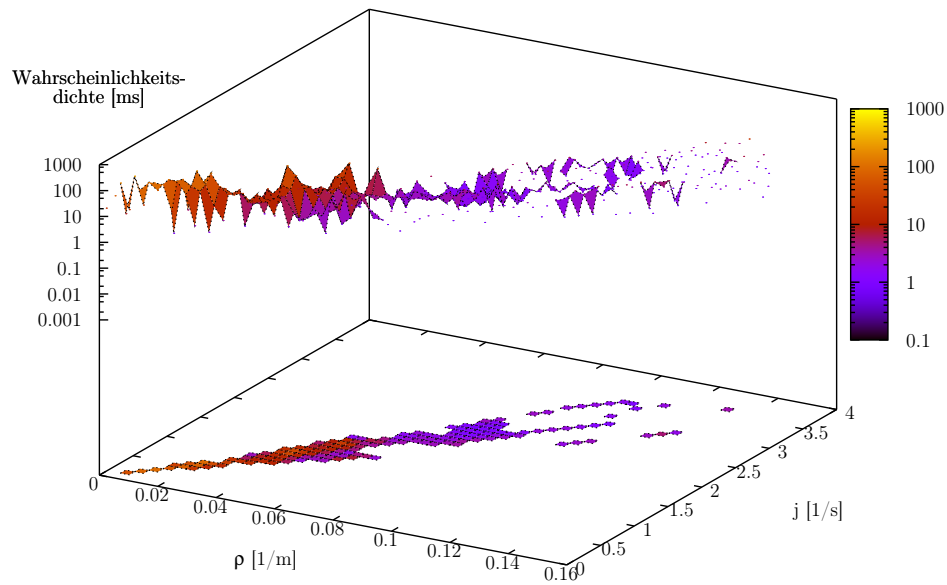


Abb. 6.2: Fundamentaldiagramm der ersten 10 Minuten; Simulation mit Parametersatz 37

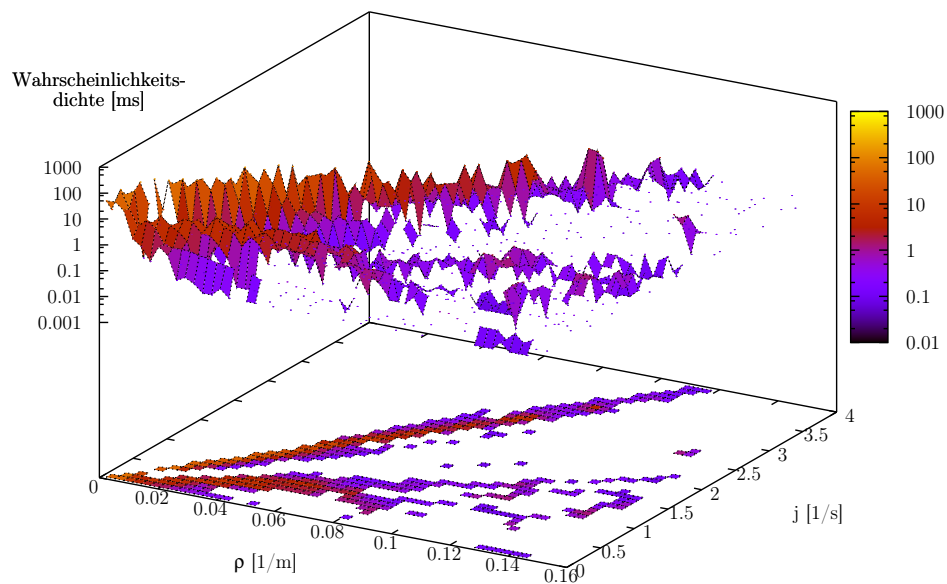


Abb. 6.3: Fundamentaldiagramm der mittleren 10 Minuten; Simulation mit Parametersatz 37

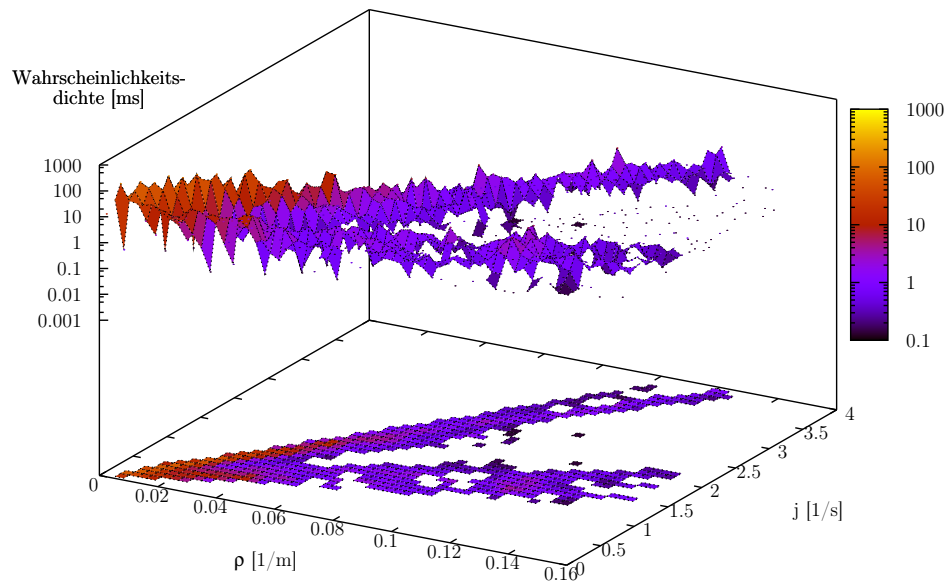


Abb. 6.4: Fundamentaldiagramm der letzten 10 Minuten; Simulation mit Parametersatz 37

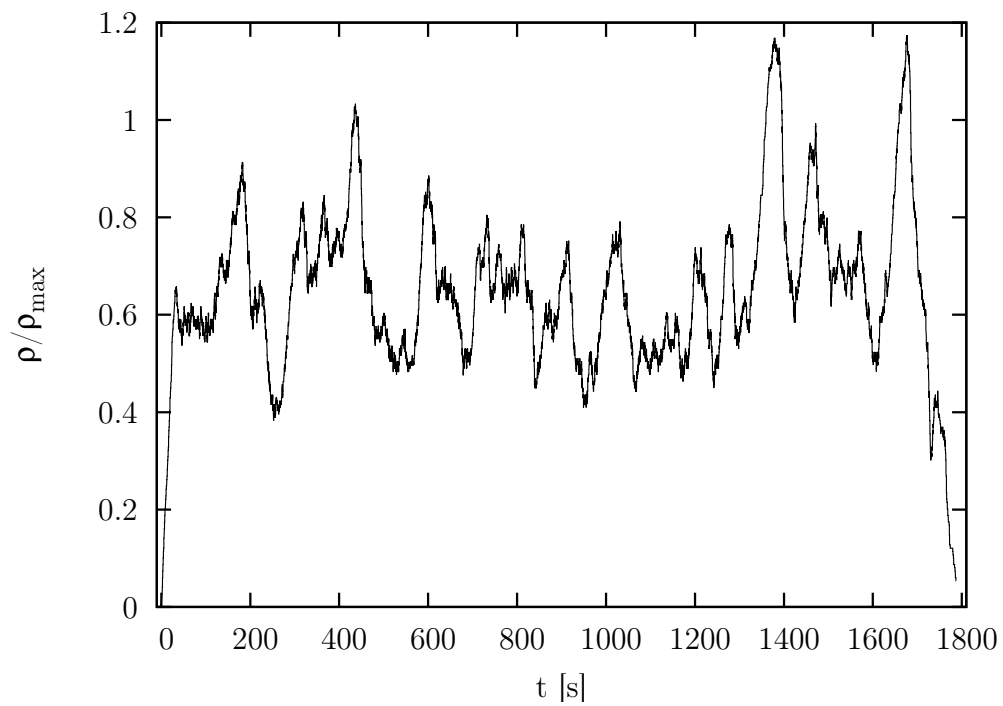


Abb. 6.5: normierter Dichteverlauf; Simulation mit Parametersatz 37

6.2 Dichteverlauf

Ein ähnliches Vorgehen kann auch bei den Dichteverläufen getätigt werden. Hierbei braucht man sich allerdings keine Gedanken über Intervallgrenzen zu machen, da im komplett verfügbaren Intervall ausgewertet wird. Statt eines Volumens wird eine Fläche betrachtet. Diese Fläche hat auch keine bestimmte normierte Größe.

Abbildung 6.5 zeigt die zu der Abbildung 4.6 analoge Auswertung der Verkehrsdichte.

6.3 Variierte Parameter

Es wurden sechs Parameter variiert.

Der erste Parameter ist die Nummer des Algorithmus, der für die Aktualisierung der Geschwindigkeit zuständig ist. Das heißt letztlich, dass die besprochenen Algorithmen alle zum Einsatz kamen. Dabei hat das in Abschnitt 5.2.2 besprochene Modell die Nummer 1, das in Abschnitt 5.2.3 Nummer 2 und das abgeänderte Bando-Modell (siehe Abschnitt 5.2.1) die Nummer 3.

Mit den drei Algorithmen wurde jeweils der betreffende Parameter variiert, also das τ für das Bando-Modell und das ϵ für die beiden anderen Algorithmen. Dabei wurden ϵ zwischen 0 und 2 mit einer Differenz von 0,1 und τ zwischen 1,5 und 31,5 mit einer Differenz von 1,5 variiert.

Einige Autos wechseln im Datensatz nicht die Spur. In der Simulation wurde diesen Fahrzeugen der Spurwechsel erlaubt bzw. verboten.

Eine Verschärfung der Spurwechselregeln kann noch erzielt werden, indem man die Richtung des Spurwechsels vorgibt. Die Richtung eines jeden Spurwechsels wurde zum einen frei gestellt, zum anderen basierend auf den Originaldaten fest vorgegeben. Ausnahmen wurden nur wie bereits beschrieben erlaubt.

Während jeder Simulation werden viele Zufallszahlen berechnet. Da es sich dabei um Pseudozufallszahlen handelt, muss ein Startwert festgelegt werden. Dieser Startwert ist der sechste und letzte Parameter, der variiert wurde. Hierbei wurden sechs verschiedene Werte verwendet.

Daraus ergeben sich 1512 Simulationen, die durchgeführt wurden. Diese Zahl verringert sich durch das Abbrechen der Simulationen bei einer zu hohen Verkehrsdichte. Abgebrochene Simulationen gehen nicht in weitere Betrachtungen ein. Parametersätze, die sich nur im Wert für die Initialisierung des Zufallsgenerators unterscheiden, werden als Einheit betrachtet. Wenn eine Simulation dieser Einheit abgebrochen wird, werden alle anderen Simulationen ebenfalls verworfen und nicht weiter untersucht. Der Grund dafür ist der, dass der Parametersatz als zu instabil angesehen werden muss, wenn die Simulation nur aufgrund von Zufallszahlen abbricht. Letztendlich bleiben 954 Simulationen übrig, die es ermöglichen sollten, den besten Parametersatz zu finden. Eine weitere Reduktion der Zahl der Simulationen ergibt sich, wenn man die Spurwechselrichtung vorgibt, da sich dann eine Auswertung, ob

ein Fahrzeug in den Originaldaten einen Spurwechsel gemacht hat, erübrigt. Somit bleiben 732 Simulationen übrig.

Nr.	Geschw.-Update	ϵ	τ	W.-Verbot	W.-Richtung fest	Abbruch
0	1	0,0	egal	nein	nein	nein
1	1	0,1	egal	nein	nein	nein
2	1	0,2	egal	nein	nein	nein
3	1	0,3	egal	nein	nein	nein
4	1	0,4	egal	nein	nein	nein
5	1	0,5	egal	nein	nein	nein
6	1	0,6	egal	nein	nein	nein
7	1	0,7	egal	nein	nein	nein
8	1	0,8	egal	nein	nein	nein
9	1	0,9	egal	nein	nein	nein
10	1	1,0	egal	nein	nein	nein
11	1	1,1	egal	nein	nein	nein
12	1	1,2	egal	nein	nein	nein
13	1	1,3	egal	nein	nein	nein
14	1	1,4	egal	nein	nein	nein
15	1	1,5	egal	nein	nein	nein
16	1	1,6	egal	nein	nein	nein
17	1	1,7	egal	nein	nein	ja
18	1	1,8	egal	nein	nein	ja
19	1	1,9	egal	nein	nein	ja
20	1	2,0	egal	nein	nein	ja
21	1	0,0	egal	ja	nein	nein
22	1	0,1	egal	ja	nein	nein
23	1	0,2	egal	ja	nein	nein
24	1	0,3	egal	ja	nein	nein
25	1	0,4	egal	ja	nein	nein
26	1	0,5	egal	ja	nein	nein
27	1	0,6	egal	ja	nein	nein
28	1	0,7	egal	ja	nein	nein
29	1	0,8	egal	ja	nein	nein
30	1	0,9	egal	ja	nein	nein
31	1	1,0	egal	ja	nein	nein
32	1	1,1	egal	ja	nein	nein
33	1	1,2	egal	ja	nein	nein
34	1	1,3	egal	ja	nein	nein
35	1	1,4	egal	ja	nein	nein
36	1	1,5	egal	ja	nein	nein
37	1	1,6	egal	ja	nein	nein
38	1	1,7	egal	ja	nein	nein

Nr.	Geschw.-Update	ϵ	τ	W.-Verbot	W.-Richtung fest	Abbruch
39	1	1,8	egal	ja	nein	ja
40	1	1,9	egal	ja	nein	ja
41	1	2,0	egal	ja	nein	ja
42	2	0,0	egal	nein	nein	nein
43	2	0,1	egal	nein	nein	nein
44	2	0,2	egal	nein	nein	nein
45	2	0,3	egal	nein	nein	nein
46	2	0,4	egal	nein	nein	nein
47	2	0,5	egal	nein	nein	nein
48	2	0,6	egal	nein	nein	nein
49	2	0,7	egal	nein	nein	nein
50	2	0,8	egal	nein	nein	nein
51	2	0,9	egal	nein	nein	nein
52	2	1,0	egal	nein	nein	nein
53	2	1,1	egal	nein	nein	nein
54	2	1,2	egal	nein	nein	nein
55	2	1,3	egal	nein	nein	nein
56	2	1,4	egal	nein	nein	nein
57	2	1,5	egal	nein	nein	ja
58	2	1,6	egal	nein	nein	ja
59	2	1,7	egal	nein	nein	ja
60	2	1,8	egal	nein	nein	ja
61	2	1,9	egal	nein	nein	ja
62	2	2,0	egal	nein	nein	ja
63	2	0,0	egal	ja	nein	nein
64	2	0,1	egal	ja	nein	nein
65	2	0,2	egal	ja	nein	nein
66	2	0,3	egal	ja	nein	nein
67	2	0,4	egal	ja	nein	nein
68	2	0,5	egal	ja	nein	nein
69	2	0,6	egal	ja	nein	nein
70	2	0,7	egal	ja	nein	nein
71	2	0,8	egal	ja	nein	nein
72	2	0,9	egal	ja	nein	nein
73	2	1,0	egal	ja	nein	nein
74	2	1,1	egal	ja	nein	nein
75	2	1,2	egal	ja	nein	nein
76	2	1,3	egal	ja	nein	nein
77	2	1,4	egal	ja	nein	nein
78	2	1,5	egal	ja	nein	nein
79	2	1,6	egal	ja	nein	ja
80	2	1,7	egal	ja	nein	ja

Nr.	Geschw.-Update	ϵ	τ	W.-Verbot	W.-Richtung fest	Abbruch
81	2	1,8	egal	ja	nein	ja
82	2	1,9	egal	ja	nein	ja
83	2	2,0	egal	ja	nein	ja
84	3	egal	1,5	nein	nein	nein
85	3	egal	3,0	nein	nein	nein
86	3	egal	4,5	nein	nein	nein
87	3	egal	6,0	nein	nein	nein
88	3	egal	7,5	nein	nein	nein
89	3	egal	9,0	nein	nein	nein
90	3	egal	10,5	nein	nein	nein
91	3	egal	12,0	nein	nein	nein
92	3	egal	13,5	nein	nein	nein
93	3	egal	15,0	nein	nein	nein
94	3	egal	16,5	nein	nein	ja
95	3	egal	18,0	nein	nein	ja
96	3	egal	19,5	nein	nein	ja
97	3	egal	21,0	nein	nein	ja
98	3	egal	22,5	nein	nein	ja
99	3	egal	24,0	nein	nein	ja
100	3	egal	25,5	nein	nein	ja
101	3	egal	27,0	nein	nein	ja
102	3	egal	28,5	nein	nein	ja
103	3	egal	30,0	nein	nein	ja
104	3	egal	31,5	nein	nein	ja
105	3	egal	1,5	ja	nein	nein
106	3	egal	3,0	ja	nein	nein
107	3	egal	4,5	ja	nein	nein
108	3	egal	6,0	ja	nein	nein
109	3	egal	7,5	ja	nein	nein
110	3	egal	9,0	ja	nein	nein
111	3	egal	10,5	ja	nein	nein
112	3	egal	12,0	ja	nein	nein
113	3	egal	13,5	ja	nein	nein
114	3	egal	15,0	ja	nein	ja
115	3	egal	16,5	ja	nein	ja
116	3	egal	18,0	ja	nein	ja
117	3	egal	19,5	ja	nein	ja
118	3	egal	21,0	ja	nein	ja
119	3	egal	22,5	ja	nein	ja
120	3	egal	24,0	ja	nein	ja
121	3	egal	25,5	ja	nein	ja
122	3	egal	27,0	ja	nein	ja

Nr.	Geschw.-Update	ϵ	τ	W.-Verbot	W.-Richtung fest	Abbruch
123	3	egal	28,5	ja	nein	ja
124	3	egal	30,0	ja	nein	ja
125	3	egal	31,5	ja	nein	ja
126	1	0,0	egal	nein	ja	nein
127	1	0,1	egal	nein	ja	nein
128	1	0,2	egal	nein	ja	nein
129	1	0,3	egal	nein	ja	nein
130	1	0,4	egal	nein	ja	nein
131	1	0,5	egal	nein	ja	nein
132	1	0,6	egal	nein	ja	nein
133	1	0,7	egal	nein	ja	nein
134	1	0,8	egal	nein	ja	nein
135	1	0,9	egal	nein	ja	nein
136	1	1,0	egal	nein	ja	nein
137	1	1,1	egal	nein	ja	nein
138	1	1,2	egal	nein	ja	nein
139	1	1,3	egal	nein	ja	nein
140	1	1,4	egal	nein	ja	nein
141	1	1,5	egal	nein	ja	nein
142	1	1,6	egal	nein	ja	nein
143	1	1,7	egal	nein	ja	ja
144	1	1,8	egal	nein	ja	ja
145	1	1,9	egal	nein	ja	ja
146	1	2,0	egal	nein	ja	ja
147	1	0,0	egal	ja	ja	nein
148	1	0,1	egal	ja	ja	nein
149	1	0,2	egal	ja	ja	nein
150	1	0,3	egal	ja	ja	nein
151	1	0,4	egal	ja	ja	nein
152	1	0,5	egal	ja	ja	nein
153	1	0,6	egal	ja	ja	nein
154	1	0,7	egal	ja	ja	nein
155	1	0,8	egal	ja	ja	nein
156	1	0,9	egal	ja	ja	nein
157	1	1,0	egal	ja	ja	nein
158	1	1,1	egal	ja	ja	nein
159	1	1,2	egal	ja	ja	nein
160	1	1,3	egal	ja	ja	nein
161	1	1,4	egal	ja	ja	nein
162	1	1,5	egal	ja	ja	nein
163	1	1,6	egal	ja	ja	nein
164	1	1,7	egal	ja	ja	ja

Nr.	Geschw.-Update	ϵ	τ	W.-Verbot	W.-Richtung fest	Abbruch
165	1	1,8	egal	ja	ja	ja
166	1	1,9	egal	ja	ja	ja
167	1	2,0	egal	ja	ja	ja
168	2	0,0	egal	nein	ja	nein
169	2	0,1	egal	nein	ja	nein
170	2	0,2	egal	nein	ja	nein
171	2	0,3	egal	nein	ja	nein
172	2	0,4	egal	nein	ja	nein
173	2	0,5	egal	nein	ja	nein
174	2	0,6	egal	nein	ja	nein
175	2	0,7	egal	nein	ja	nein
176	2	0,8	egal	nein	ja	nein
177	2	0,9	egal	nein	ja	nein
178	2	1,0	egal	nein	ja	nein
179	2	1,1	egal	nein	ja	nein
180	2	1,2	egal	nein	ja	nein
181	2	1,3	egal	nein	ja	nein
182	2	1,4	egal	nein	ja	nein
183	2	1,5	egal	nein	ja	ja
184	2	1,6	egal	nein	ja	ja
185	2	1,7	egal	nein	ja	ja
186	2	1,8	egal	nein	ja	ja
187	2	1,9	egal	nein	ja	ja
188	2	2,0	egal	nein	ja	ja
189	2	0,0	egal	ja	ja	nein
190	2	0,1	egal	ja	ja	nein
191	2	0,2	egal	ja	ja	nein
192	2	0,3	egal	ja	ja	nein
193	2	0,4	egal	ja	ja	nein
194	2	0,5	egal	ja	ja	nein
195	2	0,6	egal	ja	ja	nein
196	2	0,7	egal	ja	ja	nein
197	2	0,8	egal	ja	ja	nein
198	2	0,9	egal	ja	ja	nein
199	2	1,0	egal	ja	ja	nein
200	2	1,1	egal	ja	ja	nein
201	2	1,2	egal	ja	ja	nein
202	2	1,3	egal	ja	ja	nein
203	2	1,4	egal	ja	ja	nein
204	2	1,5	egal	ja	ja	ja
205	2	1,6	egal	ja	ja	ja
206	2	1,7	egal	ja	ja	ja

Nr.	Geschw.-Update	ϵ	τ	W.-Verbot	W.-Richtung fest	Abbruch
207	2	1,8	egal	ja	ja	ja
208	2	1,9	egal	ja	ja	ja
209	2	2,0	egal	ja	ja	ja
210	3	egal	1,5	nein	ja	nein
211	3	egal	3,0	nein	ja	nein
212	3	egal	4,5	nein	ja	nein
213	3	egal	6,0	nein	ja	nein
214	3	egal	7,5	nein	ja	ja
215	3	egal	9,0	nein	ja	nein
216	3	egal	10,5	nein	ja	ja
217	3	egal	12,0	nein	ja	ja
218	3	egal	13,5	nein	ja	ja
219	3	egal	15,0	nein	ja	ja
220	3	egal	16,5	nein	ja	ja
221	3	egal	18,0	nein	ja	ja
222	3	egal	19,5	nein	ja	ja
223	3	egal	21,0	nein	ja	ja
224	3	egal	22,5	nein	ja	ja
225	3	egal	24,0	nein	ja	ja
226	3	egal	25,5	nein	ja	ja
227	3	egal	27,0	nein	ja	ja
228	3	egal	28,5	nein	ja	ja
229	3	egal	30,0	nein	ja	ja
230	3	egal	31,5	nein	ja	ja
231	3	egal	1,5	ja	ja	nein
232	3	egal	3,0	ja	ja	nein
233	3	egal	4,5	ja	ja	nein
234	3	egal	6,0	ja	ja	nein
235	3	egal	7,5	ja	ja	ja
236	3	egal	9,0	ja	ja	nein
237	3	egal	10,5	ja	ja	ja
238	3	egal	12,0	ja	ja	ja
239	3	egal	13,5	ja	ja	ja
240	3	egal	15,0	ja	ja	ja
241	3	egal	16,5	ja	ja	ja
242	3	egal	18,0	ja	ja	ja
243	3	egal	19,5	ja	ja	ja
244	3	egal	21,0	ja	ja	ja
245	3	egal	22,5	ja	ja	ja
246	3	egal	24,0	ja	ja	ja
247	3	egal	25,5	ja	ja	ja
248	3	egal	27,0	ja	ja	ja

Nr.	Geschw.-Update	ϵ	τ	W.-Verbot	W.-Richtung fest	Abbruch
249	3	egal	28,5	ja	ja	ja
250	3	egal	30,0	ja	ja	ja
251	3	egal	31,5	ja	ja	ja

Tab. 6.1: Parameter der durchgeführten Simulationen

6.4 Berechnete Werte

Für jede Simulation können nun bestimmte Werte berechnet werden, die in der einen oder anderen Weise zur Beurteilung der jeweiligen Simulation dienen. Dies wurde bereits besprochen und soll hier konkret zusammengefasst werden.

Zunächst wird der Dichteverlauf über der Zeit erstellt. Anschließend wird die Differenzdichte zum Originaldatensatz erstellt. Von diesem Graphen wird die eingeschlossenen Fläche bestimmt. Die 6 verschiedenen Startwerte für den Zufallszahlengenerator liefern sechs Werte für die betrachtete Fläche. Der Durchschnitt dieser sechs Werte ist das Ergebnis für die Einheit aus den sechs Parametersätzen. Außerdem wird für den Mittelwert auch die Standardabweichung bestimmt.

Analoges wird bei den Volumina der Fundamentaldiagramme getan. Hierbei werden allerdings für jeden simulierten Datensatz insgesamt 68 Fundamentaldiagramme erstellt, wobei Trennungen nach Spuren und Fahrzeugtyp vorgenommen werden. Des weiteren werden die Datensätze in drei Zeit- und drei Raumzonen unterteilt. Es werden verschiedene Kombinationen dieser Unterteilungen ausgewertet (siehe Tabelle 6.2).

Nr.	Fahrzeugart	räumlicher Abschnitt	Zeitintervall	Spur
1	alle	komplett	komplett	alle
2	alle	komplett	40-640 s	alle
3	alle	komplett	640-1240 s	alle
4	alle	komplett	1240-1840 s	alle
5	alle	komplett	komplett	1
6	alle	komplett	komplett	2
7	alle	komplett	komplett	3
8	alle	komplett	komplett	4
9	alle	komplett	komplett	5
10	alle	komplett	komplett	6
11	alle	komplett	komplett	7
12	alle	komplett	komplett	8
13	alle	0-300 m	komplett	alle
14	alle	300-600 m	komplett	alle
15	alle	600-900 m	komplett	alle
16	PKWs	komplett	komplett	alle
17	LKWs	komplett	komplett	alle

Nr.	Fahrzeugart	räumlicher Abschnitt	Zeitintervall	Spur
18	alle	0-300 m	komplett	1
19	alle	0-300 m	komplett	2
20	alle	0-300 m	komplett	3
21	alle	0-300 m	komplett	4
22	alle	0-300 m	komplett	5
23	alle	0-300 m	komplett	6
24	alle	300-600 m	komplett	1
25	alle	300-600 m	komplett	2
26	alle	300-600 m	komplett	3
27	alle	300-600 m	komplett	4
28	alle	300-600 m	komplett	5
29	alle	300-600 m	komplett	6
30	alle	600-900 m	komplett	1
31	alle	600-900 m	komplett	2
32	alle	600-900 m	komplett	3
33	alle	600-900 m	komplett	4
34	alle	600-900 m	komplett	5
35	alle	600-900 m	komplett	6
36	alle	0-300 m	40-640 s	alle
37	alle	0-300 m	640-1240 s	alle
38	alle	0-300 m	1240-1840 s	alle
39	alle	300-600 m	40-640 s	alle
40	alle	300-600 m	640-1240 s	alle
41	alle	300-600 m	1240-1840 s	alle
42	alle	600-900 m	40-640 s	alle
43	alle	600-900 m	640-1240 s	alle
44	alle	600-900 m	1240-1840 s	alle
45	alle	komplett	40-640 s	1
46	alle	komplett	40-640 s	2
47	alle	komplett	40-640 s	3
48	alle	komplett	40-640 s	4
49	alle	komplett	40-640 s	5
50	alle	komplett	40-640 s	6
51	alle	komplett	40-640 s	7
52	alle	komplett	40-640 s	8
53	alle	komplett	640-1240 s	1
54	alle	komplett	640-1240 s	2
55	alle	komplett	640-1240 s	3
56	alle	komplett	640-1240 s	4
57	alle	komplett	640-1240 s	5
58	alle	komplett	640-1240 s	6
59	alle	komplett	640-1240 s	7

Nr.	Fahrzeugart	räumlicher Abschnitt	Zeitintervall	Spur
60	alle	komplett	640-1240 s	8
61	alle	komplett	1240-1840 s	1
62	alle	komplett	1240-1840 s	2
63	alle	komplett	1240-1840 s	3
64	alle	komplett	1240-1840 s	4
65	alle	komplett	1240-1840 s	5
66	alle	komplett	1240-1840 s	6
67	alle	komplett	1240-1840 s	7
68	alle	komplett	1240-1840 s	8

Tab. 6.2: Kombinationen der Parameter für die Fundamentaldiagramme

6.5 Mittelwerte und Standardabweichungen

Wie bereits erwähnt, werden sechs Simulationen mit einem Parametersatz durchgeführt, bei denen sich nur der Initialisierungswert des Zufallzahlengenerators unterscheidet. Aus diesen sechs Simulationen berechnete Werte können gemittelt werden. Außerdem kann man die Standardabweichung des Mittelwertes nach der Formel

$$\sigma_{\bar{x}} = \frac{\sigma_x}{\sqrt{N}} = \sqrt{\frac{1}{N(N-1)} \sum_{i=1}^N (x_i - \bar{x})^2} \quad (6.2)$$

berechnen.

Aus diesen Werten lässt sich bestimmen, wie gut die Simulation und wie stabil das Ergebnis ist.

6.6 Der beste Parametersatz

Eine Vorauswahl für den besten Parametersatz wurde wie beschrieben getroffen. Um weitere Sätze auszusortieren, sollte man sich klar machen, was einen guten Parametersatz ausmacht.

- Der Parametersatz sollte möglichst stabil sein. Wenn ein einzelner Parameter leicht geändert wird, sollte dies die Simulation nicht stören.
- Ein guter Parametersatz sollte in allen Bereichen gut funktionieren. Das heißt, er sollte nicht auf einer Spur sehr gute Ergebnisse und auf einer anderen Spur Ergebnisse sehr weit ab von der Realität liefern. Mit anderen Worten, der Parametersatz sollte keine Schwächen haben.

Bei dem Versuch, den besten Parametersatz zu finden, wurde wie folgt vorgegangen. Wie bereits erklärt, wurden für jeden Parametersatz 69 Werte berechnet (ein

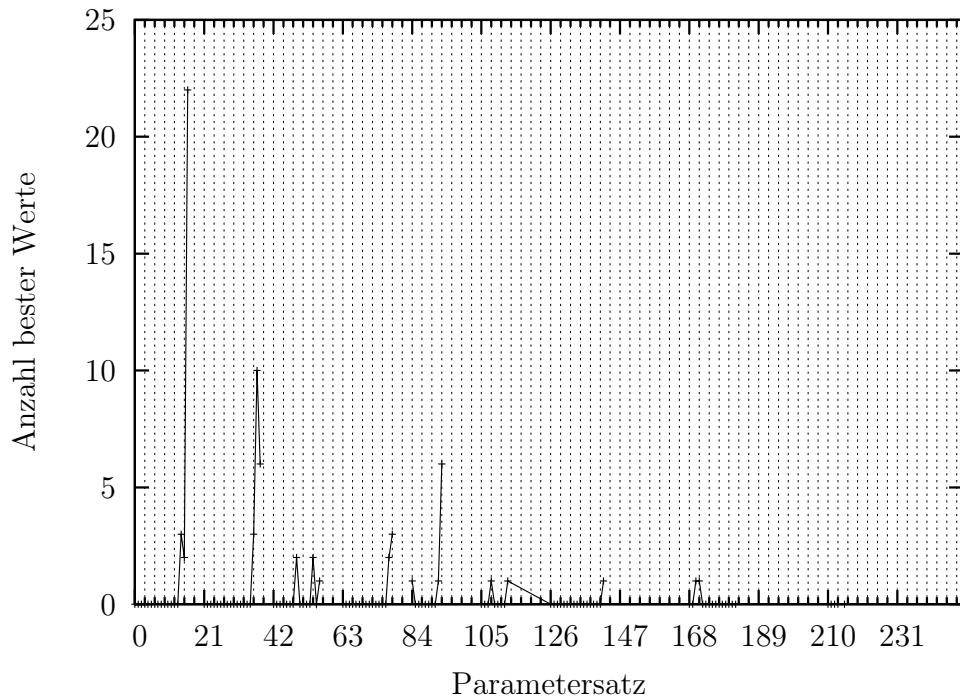


Abb. 6.6: Der beste Parametersatz ist hier Nummer 16.

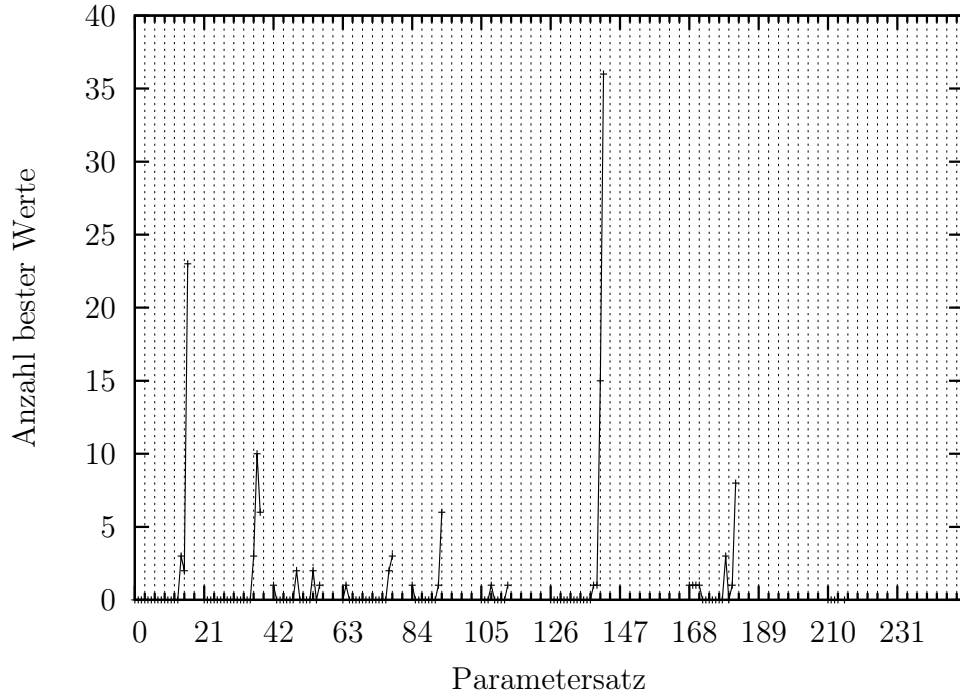


Abb. 6.7: Die Parametersätze wurden in zwei Gruppen gegliedert, Nummer 16 und 142 sind hier die besten Parametersätze.

Dichtediagramm und 68 Fundamentaldiagramme), die sich jeweils als Mittelwerte von sechs Simulationen mit unterschiedlichen Zufallszahl-Initialisierungen ergaben. Anschließend wurde gezählt, wie oft der jeweilige Parametersatz der Beste war. Dies ist in Abbildung 6.6 dargestellt. Die Nummern auf der x -Achse entsprechen den Nummern in Tabelle 6.1. Die y -Werte geben die Anzahl an, wie oft der jeweilige Parametersatz den besten Parametersatz darstellt. An Stellen, an denen kein Wert abgetragen ist, war die Simulation instabil und wurde nicht weiter ausgewertet. In der Abbildung kann man sehr gut sehen, dass der Parametersatz Nummer 16 eindeutig die besten Ergebnisse erzielt. In Abbildung 6.7 wurden zwei Gruppen gebildet, eine mit fest vorgegebener Spurwechselrichtung ($x \geq 126$) und eine ohne ($x \leq 125$), und diese unabhängig voneinander ausgewertet. Man kann erkennen, dass sich wiederum Parametersatz Nummer 16 als gut erweist. Zusätzlich sieht man jedoch auch, dass sich Parametersatz Nummer 142 in seiner Gruppe deutlich durchsetzt.

Bei beiden Auswertungen kann man erkennen, dass sich Parametersätze als die Besten erwiesen haben, die ein Extremum in ihrem jeweiligen Parameter für das Geschwindigkeits-Update beinhalten. Bei einer weiteren Erhöhung des Parameters wurden die Simulationen instabil. Aus den recht wenigen Simulationen (sechs) folgt eine gewisse Unsicherheit gegenüber der Stabilität der Parameter, die ein solches Extremum darstellen. Aus dieser Unsicherheit heraus werden solche Randpunkte ebenfalls als instabil angesehen und ignoriert.

Die Abbildungen 6.8 und 6.9 zeigen das Ergebnis analog zu den Abbildungen 6.6 und 6.7. Der insgesamt beste Parameter ist nun die Nummer 37. Bei getrennter Wertung sind es die Parameter Nummer 37 und 141. Der bessere Parametersatz ist klar die Nummer 37. Es lohnt sich jedoch auch, die Nummer 141 genauer zu betrachten.

Abbildung 6.10 zeigt deutlich, dass die beiden Parametersätze keine wirklichen Schwachstellen haben. Man sieht, dass bei beiden kein schlechtester Wert gefunden wurde.

Es ist interessant zu sehen, dass sich sehr deutlich der erste Geschwindigkeit-Update-Algorithmus durchgesetzt hat. Das ist deshalb interessant, da es eigentlich der einfachste Algorithmus ist, der anfangs nur für prinzipielle Tests verwendet wurde. Die dazu gehörigen Parameter sind zum einen $\epsilon = 1,6$ (Nummer 37) und zum anderen $\epsilon = 1,5$ (Nummer 141), liegen also sehr dicht beisammen. Einen sehr großen Einfluss scheint der Spurwechsel-Algorithmus zu haben, durch den sich die Parametersätze unterscheiden. Wenn man die Spurwechselrichtung vorgibt, wird die Simulation durchgehend schlechter. Dies ist interessant, da dieses Wissen natürlich in Echtzeit nicht gegeben wäre. Vorteilhaft scheint jedoch zu sein, dass man weiß, ob ein Fahrer einen Spurwechsel machen wird oder nicht. Eine Korrelation zwischen Spurwechseln und Aggression des Fahrers scheint es nicht zu geben. Die aggressiven bzw. nicht aggressiven Fahrer wechselten jeweils etwa zur Hälfte die Spur bzw. taten dies nicht.

Der Vergleich der Abbildungen 6.6 und 6.7 zeigt deutlich, dass sich der Parametersatz 141 nur in seiner Gruppe durchsetzen kann. Insgesamt gesehen ist er relativ

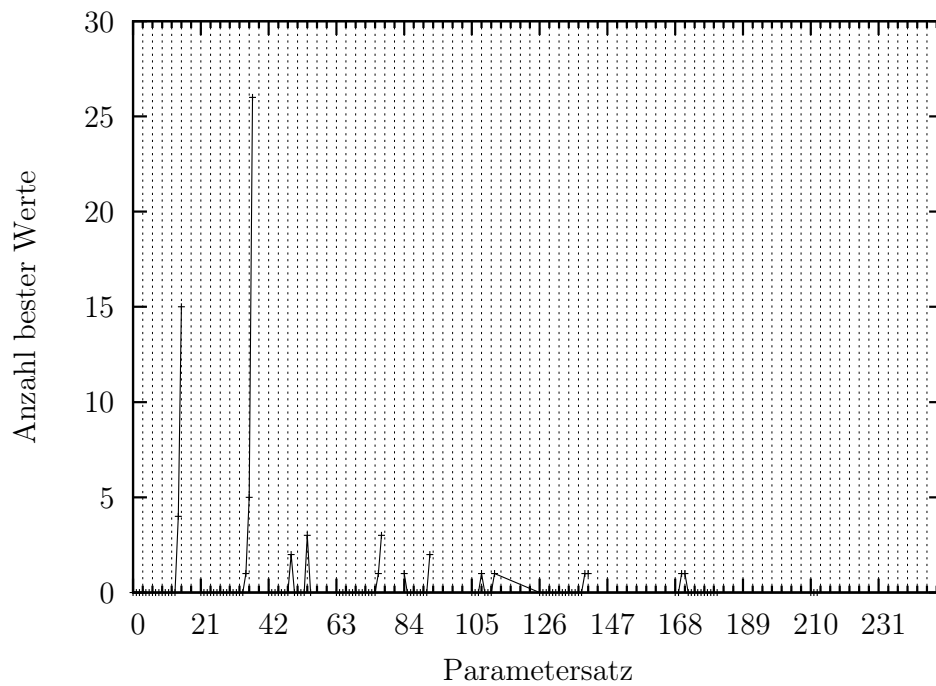


Abb. 6.8: Nach Vernachlässigung von Extremwerten ist der beste Parametersatz die Nummer 37.

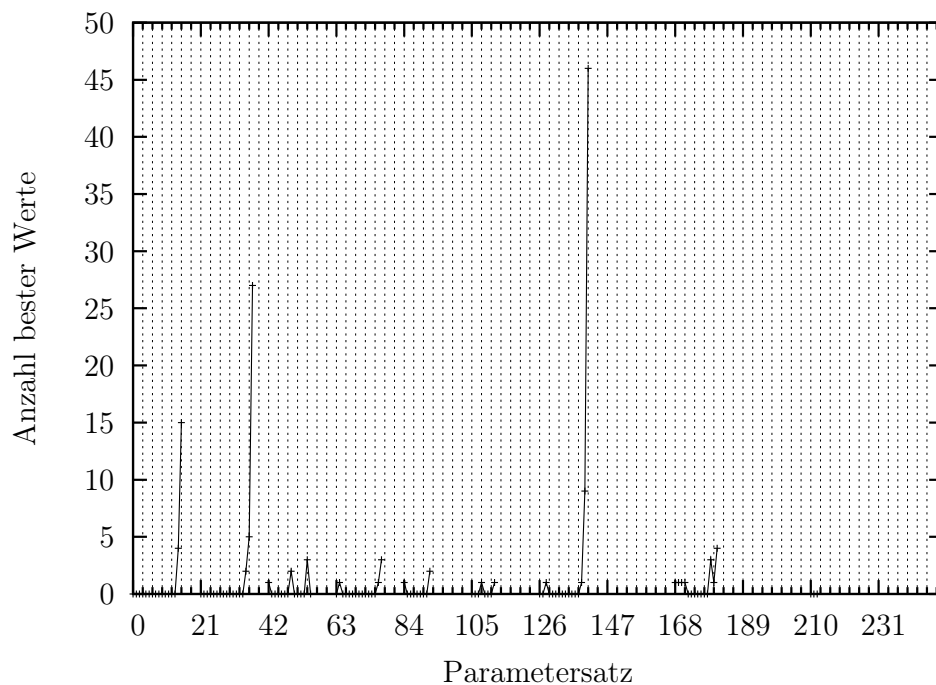


Abb. 6.9: Nach Vernachlässigung von Extremwerten und Gliederung der Parametersätze in zwei Gruppen stechen Nummer 37 und 141 deutlich hervor.

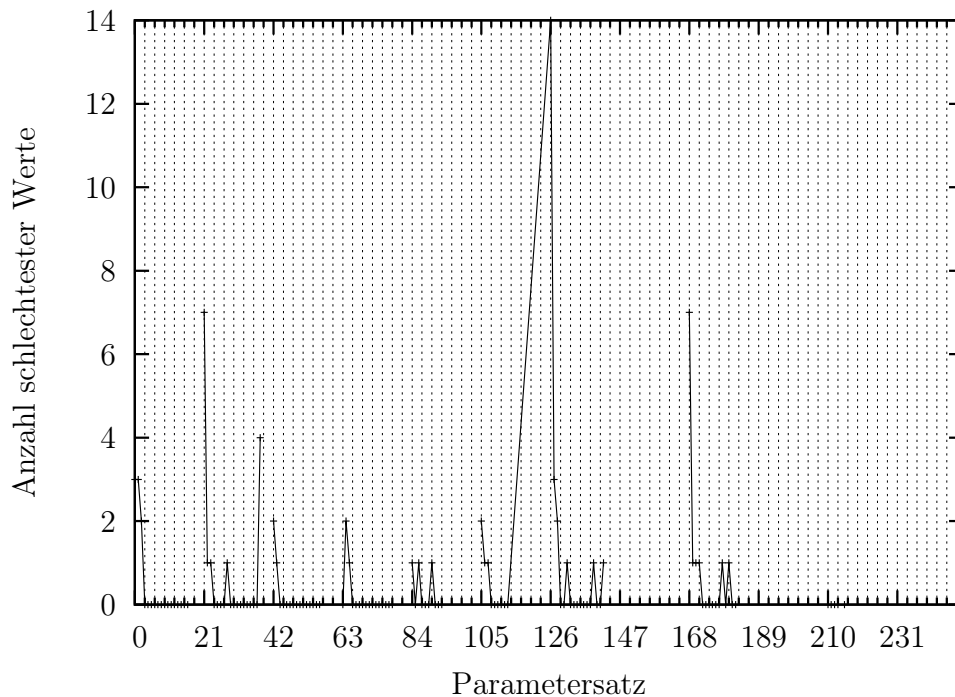


Abb. 6.10: Die Parametersätze 37 und 141 sind bei keiner Auswertung die schlechtesten.

schlecht. Aus diesem Grund wird nur noch der Parametersatz Nummer 37 betrachtet.

Wie bereits erwähnt, hat sich der Parametersatz Nummer 37 erst durchgesetzt, als die Extrem- oder Randwerte der Parameter nicht mehr in die Betrachtungen einfließen. Das ist insofern interessant, da natürlich ein Parametersatz, der ein *lokales* Minimum (in den untersuchten Werten, siehe Tabelle 6.2) darstellt, interessant ist, da er weit weg vom instabilen Bereich ist und trotzdem die besten Resultate liefert. Abbildung 6.6 zeigt, dass dies für den Parametersatz 37 zutrifft.

6.7 Schwächen des Parametersatzes

In der Summe ist der gefundene sicher der beste der untersuchten Parametersätze. Er zeigt jedoch bei bestimmten Auswertungen Schwächen. Wie die Abbildung 6.11 zeigt, ist die Situation auf Spur 7 so, dass andere Parametersätze die besten Ergebnisse liefern, als die bisher betrachteten. Überhaupt scheint auf Spur 7 die Simulation anders zu funktionieren, da besonders kleine Werte für die Parameter des Spurwechsels die besten Ergebnisse liefern. Dies ist auf keiner anderen Spur der Fall.

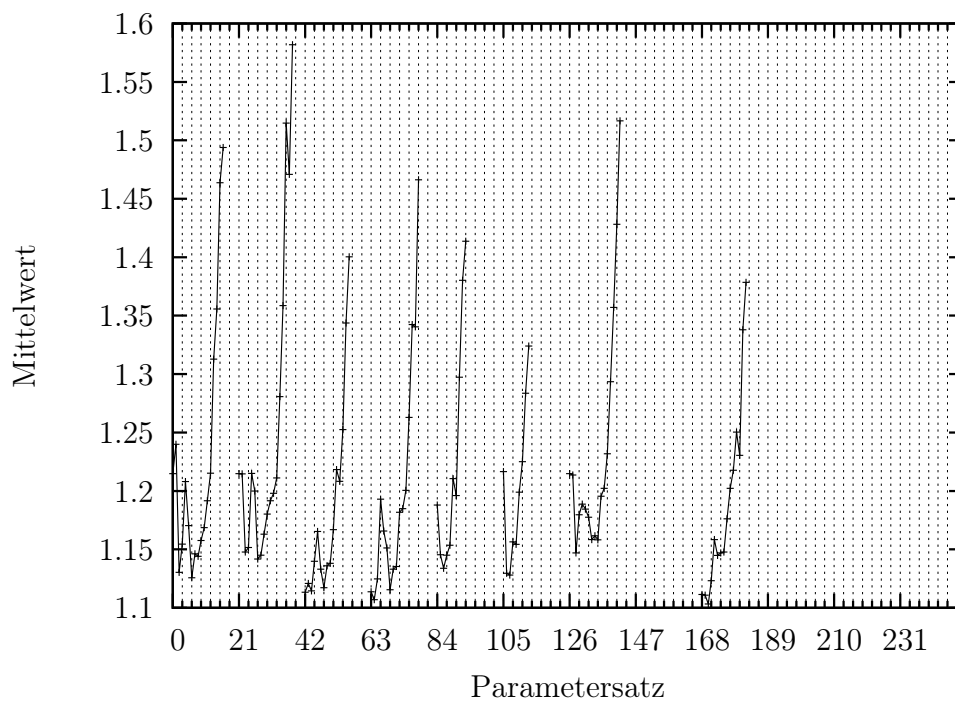


Abb. 6.11: Fundamentaldiagrammauswertung für das Fundamentaldiagramm Nummer 11 (siehe Tabelle 6.2): Spur 7 liefert grundsätzlich andere Ergebnisse als die restlichen Spuren.

7 Zusammenfassung und Ausblick

7.1 Was wurde getan?

Der Ausgangspunkt dieser Diplomarbeit war ein detaillierter Trajektoriendatensatz, der zum Zeitpunkt seiner Erstellung einzigartig war.

Der Datensatz wurde umfangreich untersucht und auf Fehler überprüft. Es wurden grobe Fehler in der Spureinordnung gefunden, die korrigiert wurden. Außerdem wurden die Geschwindigkeits- und Beschleunigungsdaten mit dem Savitzky-Golay-Filter geglättet. Dafür wurden die Ortsdaten, also in gewisser Weise die eigentlichen Messdaten, temporär geglättet.

Aus den geglätteten Daten wurden Werte wie Höchstgeschwindigkeit und Anzahl der Spurwechsel für jedes Fahrzeug einzeln extrahiert, wodurch eine gewisse Individualisierung erzielt werden sollte.

Diese Individualdaten dienten als Grundlage für eine Simulation, die den kompletten Datensatz nachstellen sollte. Die Simulation lässt sich durch diverse Parameter anpassen. Diese Parameter wurden variiert und die entstehenden Datensätze analysiert.

Durch das Bilden von Fundamentaldiagrammen und Dichteverläufen konnten Werte erzeugt werden, die die jeweilige Simulation mit den Realdaten vergleichbar machten. Aus diesen Werten konnte ein Parametersatz ermittelt werden, der die Realdaten bestmöglich wiedergibt.

Unter anderem hat sich heraus gestellt, dass der einfachste Algorithmus zur Aktualisierung der Geschwindigkeit der erfolgreichste ist. Außerdem ist es vorteilhaft zu wissen, ob ein Fahrer einen Spurwechsel machen will oder nicht.

7.2 Was wurde nicht getan?

Bisher wurde davon ausgegangen, dass die Änderung der Geschwindigkeit unabhängig von Spurwechseln ist. Dies ist sicher nicht sehr realitätsnah, da man vor einem Spurwechsel versucht, die Geschwindigkeit der Nachbarspur zu erreichen. Eine Kopplung der beiden Algorithmen wäre hier sicher interessant und lohnenswert zu untersuchen.

Um die Algorithmen der Geschwindigkeits-Aktualisierung besser zu verstehen, könnte man Fahrzeugpaare suchen, die möglichst eine weite Strecke hintereinander gefahren sind. Die Trajektorie des hinteren Fahrzeugs könnte optimiert werden, dass heißt, sie möglichst mit der Originaltrajektorie zur Deckung zu bringen. Dies würde

es ermöglichen, die Algorithmen unabhängig vom Spurwechsel zu analysieren. Auch eine individuelle Anpassung der Parameter wäre somit möglich.

Der Spurwechsel ist wie bereits beschrieben ein sehr komplexer Vorgang. Eine intensivere Betrachtung der Spurwechsel im Datensatz (Wann und aus welchen Gründen werden Spurwechsel getätigt?) würde hier sicher eine weitere Optimierung ermöglichen. In der Simulation beispielsweise erfolgt ein Spurwechsel instantan. Der nächste Spurwechsel darf dann zwar erst eine gewisse Zeit später erfolgen, ein Blockieren von beiden Spuren wie in der Realität erfolgt jedoch nicht.

In der Simulation wird für das Geschwindigkeits-Update nur der jeweilige Vordermann betrachtet. Beim Spurwechsel sind es der Vordermann und die vier Fahrzeuge der Nachbarspuren (links vorn, rechts vorn, links hinten, rechts hinten). Im Straßenverkehr gehen jedoch auch weitere Fahrzeuge in die Strategie mit ein. Beispielsweise ist ein bremsender LKW auch drei Fahrzeuge weiter hinten sichtbar. Diese langreichweitigen Korrelationen ergeben sich in der Simulation nur indirekt. Eine Untersuchung der direkten Korrelationen wäre hier hilfreich.

Der gefundene Parametersatz liefert bei dem gegebenen Datensatz die beste Übereinstimmung. Ein zweiter Datensatz, der eventuell auch Situationen wie Stau beinhaltet, wäre sinnvoll, um zu testen, wie allgemeingültig der Parametersatz ist. Nur auf diese Weise lässt sich heraus finden, ob die Simulation auch zur Vorhersage von bestimmten Verkehrssituationen dienen kann.

7.3 Zukünftige Anwendungen

Die Simulation selbst und die vorgestellten Algorithmen stellen eine Basis dar, um verschiedene Verkehrsmodelle zu testen und zu optimieren. Getan wurde dies exemplarisch an einem Trajektorien-Datensatz und drei Modellen. Die Simulation selbst ist so gestaltet, dass sie einfach auf andere Verkehrssituationen angepasst werden kann. Einschränkungen sind dahingehend gegeben, dass alle Spuren in die gleiche Richtung führen und es keine Kreuzungen geben darf. Außerdem muss bedacht werden, dass ein Überholvorgang auf allen Spuren gemacht werden darf. Das heißt, für deutsche Autobahnen müsste die Simulation tiefergehender geändert werden. Zusätzlich ist der Einbau von weiteren Algorithmen zur Aktualisierung der Geschwindigkeit kein Problem. Über eine Konfigurationsdatei lassen sich auch viele Simulationen hintereinander durchführen, ohne dass eine Neukompilierung nötig ist.

Insgesamt liefert diese Diplomarbeit Grundlagen zum tieferen Verständnis des heutigen Verkehrsgeschehens und ist somit auch Grundlage für das gezielte Eingreifen in den Straßenverkehr durch externe Verkehrsleitsysteme oder fahrzeuginterne Hilffsysteme wie Abstandskontrollen oder Navigationssysteme.

Literaturverzeichnis

- [1] Bando, M., Hasebe, K., Nakayama, A., Shibata, A., Sugiyama, Y.: Dynamical model of traffic congestion and numerical simulation, *Physical Review E*, 51(2):1035-1042, Februar 1995
- [2] Edie, L. C.: Car following and steady-state theory for non-congested traffic, *Operations Research* 9, pp. 66-77, 1961
- [3] Greenshields, B. D.: A study of highway capacity, *Proceedings Highway Research Record*, Washington Volume 14, pp. 448-477, 1934
- [4] Lighthill, M. J., Whitham, J. B.: On kinematic waves, I: Flow movement in long rivers, II: A theory of traffic flow on long crowded roads, *Proceedings of the Royal Society, London, Series A*, Vol. 229 pp. 281-345, 1955
- [5] Prigogine, I., Herman, R.: *Theory of traffic flow*, Elsevier, Amsterdam 1971
- [6] Prigogine, I., Herman, R.: *Kinetic theory of vehicular traffic*, Elsevier, New York, 1971
- [7] Richards, P. I.: Shockwaves on the highway, *Operations Research* 4, pp. 42-51, 1956
- [8] Treiterer, J., Myers, J. A.: The Hysteresis Phenomena in Traffic Flow, *Proceedings of the 6th International Symposium on Transportation and Traffic Flow Theory*, pp. 13-38, 1974
- [9] Vattulainen I., Ala-Nissila T., and Kankaala K.: Physical tests for random numbers in simulations, *Physical Review Letters*, 73(19):2513-2516, November 1994
- [10] NUMERICAL RECIPES IN C: THE ART OF SCIENTIFIC COMPUTING, pp. 650-655, ISBN 0-521-43108-5, Cambridge University Press, 1992
- [11] *Traffic Flow Theory 2005*, ISBN 0309094089, Transportation Research Board, 2006
- [12] Artikel *Automobil/Tabellen und Grafiken*.
In: Wikipedia, Die freie Enzyklopädie.
Bearbeitungsstand: 4. Juli 2006, 10:28 UTC.

- URL: http://de.wikipedia.org/w/index.php?title=Automobil/Tabellen_und_Grafiken&oldid=18599955
(Abgerufen: 15. August 2006, 09:13 UTC)
- [13] Artikel *Automobil*.
In: Wikipedia, Die freie Enzyklopädie.
Bearbeitungsstand: 31. Juli 2006, 12:55 UTC.
URL: <http://de.wikipedia.org/w/index.php?title=Automobil&oldid=19619749>
(Abgerufen: 15. August 2006, 09:50 UTC)
- [14] Artikel *Verkehrswissenschaften*.
In: Wikipedia, Die freie Enzyklopädie.
Bearbeitungsstand: 14. August 2006, 05:30 UTC.
URL: <http://de.wikipedia.org/w/index.php?title=Verkehrswissenschaften&oldid=20160483>
(Abgerufen: 15. August 2006, 09:49 UTC)
- [15] Artikel *VERBIEST*, *Ferdinand SJ*, *chin. Nan Huairen Duanbei*.
In: Biographisch-Bibliographisches Kirchenlexikon.
Bearbeitungsstand: 06. März 2003.
URL: http://www.bautz.de/bbkl/v/verbiest_f.shtml
(Abgerufen: 10. August 2006, 15:13 CET)
- [16] DLR Portal - Home.
Bearbeitungsstand: 16. August 2006.
URL: <http://www.dlr.de/>
(Abgerufen: 16. August 2006, 15:18 CET)
- [17] NGSIM.
Bearbeitungsstand: 16. August 2006.
URL: <http://ngsim.fhwa.dot.gov/>
(Abgerufen: 16. August 2006, 14:42 CET)

Danksagung

Hiermit möchte ich mich bei all denen bedanken, die mir bei der Ausarbeitung meiner Diplomarbeit behilflich waren. Insbesondere bedanke ich mich bei meinen Betreuern Reinhard Mahnke und Peter Wagner für die wissenschaftliche Unterstützung. Des weiteren danke ich Julia Hinkel und Kai-Uwe Thiessenhusen für viele anregende Diskussionen.

Schlussendlich möchte ich mich bei den Erfindern des Rades bedanken, ohne die diese Arbeit nicht möglich gewesen wäre.

Erklärung

Hiermit versichere ich, dass ich die vorliegende Arbeit selbstständig angefertigt und ohne fremde Hilfe verfasst habe, keine außer den von mir angegebenen Hilfsmitteln und Quellen dazu verwendet habe und die den benutzten Werken inhaltlich und wörtlich entnommenen Stellen als solche kenntlich gemacht habe.

Rostock, den 17. August 2006

Christof Liebe